كراسات علمية
سلسلة غير دورية تعنى بالإنجازات العلمية الحديثة

رحلة فى هندسة الإلكترونيات

إعداد
أ. د. السيد عبد الهادى طلخان

تصدرها :
المكتبة الأكاديمية

رئيس التحرير
أ. د. أحمد شوقى

مدير التحرير
أ. أحمد أمين



المكتبة الأكاديمية
ش م م - القاهرة

كراسات « علمية »

سلسلة غير دورية تصدرها المكتبة الأكاديمية

تعنى بتقديم الاجتهادات العلمية الحديثة

رئيس التحرير أ.د. أحمد شوقى مدير التحرير أ. أحمد أمين

المراسلات : المكتبة الأكاديمية

١٢١ ش التحرير - الدقى - القاهرة ت : ٣٤٨٥٢٨٢ - فاكس ٣٤٩١٨٩٠ (٢٠٢)



رحلة فى هندسة الإلكترونيات

رحلة فى
هندسة الإلكترونيات

إعداد
أ.د./ السيد عبدالهادى طلخان
أستاذ الإلكترونيات - كلية الهندسة
جامعة القاهرة



الناشر
المكتبة الأكاديمية
٢٠٠١

حقوق النشر

المكتبة الأكاديمية

١٢١ شارع التحرير - الدقى - القاهرة

تليفون : ٣٤٨٥٢٨٢ / ٣٤٩١٨٩٠

فاكس : ٣٤٩١٨٩٠ - ٢٠٢

هذه السلسلة

تعد استجابة منطقية لما لقيته شقيقتها الكبرى « كراسات مستقبلية » التى بدأ ظهور أعدادها الأولى عام ١٩٩٧ ، من الترحاب والتشجيع ، المقرونين بالدعوة إلى زيادة مساحة العلم فى إصدارات السلسلة إلى أقصى حد ممكن .

لقد دفعتنا هذه الدعوة إلى التفكير فى أن نفرد للموضوعات العلمية سلسلة خاصة ، تستحقها ، فكانت هذه السلسلة ، التى تمثل تطويراً وتوسعاً فى أحد محاور «كراسات مستقبلية» ، حيث ذكر فى مقدمتها ما نصه :

« الإلمام بمنجزات الثورة العلمية والتكنولوجية ، التى تعد قوة الدفع الرئيسية فى تشكيل العالم ، مع استيعاب تفاعلها مع الجديد فى العلوم الاجتماعية والإنسانية ، من منطلق الإيمان بوحدة المعرفة » .

ومن ملامح هذه السلسلة :

المحافظة – على شكل المقال التفصيلى الطويل (Monograph) الذى تتميز به الكراسات عادة .

* الحرص على تقديم الاتجاهات والأفكار العلمية الجديدة ، بجانب تقديم المعارف الخاصة بمختلف المجالات الحديثة ، بشكل يسمح للقارئ « المتعلم غير المتخصص » ، الذى يمثل القارئ المستهدف للكراسات ، بالقدر الكافى من الإلمام والقدرة على المتابعة .

* وفى تقديمها للاتجاهات والمعارف العلمية الحديثة ، لن تتبنى الكراسات الشكل النمطى لتبسيط العلوم ، الذى يستهدف النجاح فى إضافة كمية – قلت أو كثرت – لبعض المعارف العلمية – إلى ثقافة المتلقى . إننا لا نتعامل مع هذا العلم كإضافة ، ولكن كمكون عضوى أصيل للثقافة المعاصرة ، وهو مكون ثرى، يتضمن المناهج والمعلومات والأفكار والاتجاهات .

* وتأكيداً لعدم النمطية ، ستتسع السلسلة للتأليف والترجمة والعرض ، وتتضمن اجتهادات التبسيط والتنظير والاستشراف ، وستنطلق من أهمية تضامن المعرفة والحكمة وارتباط العلم الحديث بالتكنولوجيا technoscience ، مع التركيز على أهمية ارتباطهما معا بالأخلاق .

وبعد ، فإننى أتقدم بالشكر إلى كل الزملاء الذين تحمسوا للفكرة ، وساهموا فى تقديم المادة العلمية للسلسلة . وباسمهم وباسمى أشكر الصديق العزيز الأستاذ العزيز الأستاذ أحمد أمين ، الناشر المثقف الذى احتفى مــن قبل بسلسلة « كراسات مستقبلية » ، وشجعنا على إصدار هذه السلسلة الجديدة . والله الموفق .

هذه الكراسة

تدعو القارئ إلى رحلة بصحبة أستاذ قدير ، عرف طريق العلم الجاد والعطاء المتميز ، قائدنا فى هذه الرحلة إلى عالم الإلكترونيات هو أستاذنا الدكتور السيد طلخان ، الأستاذ بقسم هندسة الإلكترونيات والإتصالات الكهربية بكلية الهندسة جامعة القاهرة ، وهو القسم الذى تدرج فى وظائفه منذ تخرجه عام ١٩٥٣ ، وصار رئيساً له عام ١٩٨٤ وأستاذاً متفرغاً به منذ عام ١٩٩٠ ، والدكتور طلخان درس الدكتوراه بجامعة مانشستر بإنجلترا ، وحصل عليها عام ١٩٥٨ ، وخلال مسيرته العلمية حصل على ثلاث براءات إختراع ونشر كتاباً باللغة الإنجليزية فى هندسة الإلكترونيات عام ١٩٧١ ، كما حصل على جائزة الدولة التشجيعية ١٩٨٩ ونوط الإمتياز من الدرجة الأولى عام ١٩٩٥ ، وقد قاد مؤلفنا مجموعات بحثية عديدة فى مجال الإلكترونيات الدقيقة ، ممولة محلياً أو خارجياً ، وأعطى خلال كل أنشطته نموذجاً للأستاذ القدوة الذى ندين له بالحب والإحترام .

لقد كان مشروع كتابة الكراسة الحالية كأول عمل غير أكاديمى يتصدى له مؤلفنا أمراً أخذه بجديته المعروفة ، ذاكراً ندرة النشر العربى المبسط فى مجال الإلكترونيات الدقيقة ، الذى يستوحى من "إسمها" الدقة حتى لا يكون التبسيط مخلاً ، واضعاً فى إعتباره أن يقدم المفاهيم والحقائق بأسلوب واضح بالنسبة للقارئ المتعلم غير المتخصص ، وأسرة الكراسات عموماً ، وسلسلة "كراسات علمية" بالذات تشرُفان بانضمام الدكتور طلخان إلينا ، فمرحباً به .

د. أحمد شوقى

الصفحة

المحتـــويـــــات

الصفحة

مقدمة

هناك اتفاق أننا نعيش حالياً فى عصر المعلومات . وثورة المعلومات من ناتج التقدم فى الإلكترونيات الحديثة ، أو ما يعرف بالإلكترونيات الدقيقة . كما أننا جميعاً نلمس تغلغل الإلكترونيات حالياً فى كل أنماط الحياة الفردية والجماعية المحلية والدولية ، من صناعات مدنية وصناعات حربية واكتشافات فى الفضاء واكتشافات فى جوف الأرض وخدمات مختلفة ترفيهية وغير ذلك . كذلك ، فإننا جميعاً نرى من حولنا انتشار الأجهزة الإلكترونية بين الأفراد والعائلات والمؤسسات . فأصبح الحاسب الآلى ، والتليفون المتنقل والمحمول ، والفاكس ، والتعامل مع شبكة الإنترنت ، وغير ذلك ، أنشطة عادية يمارسها الإنسان العادى يومياً ويستفيد منها بصورة لم يكن يتخيلها من قبل . معنى ذلك ، أن المتخصصين وغير المتخصصين يستعملون الإلكترونيات يومياً سواء شعروا بذلك أو لم يشعروا . لذلك ، لم تعد الإلكترونيات مغلقة على المتخصصين فقط ، بل كثر فيها الهواة وآخرون ممن يتطلعون للاستنارة ولو بقدر يسير عن السر وراء تلك الأجهزة التى يستعملونها بصفة مستمرة ، وأصبحت جزءاً من حياتهم . .

هناك مئات الكتب المتوفرة كمراجع فى عديد من أفرع الإلكترونيات ، ولكن معظم الجاد منها مؤلف باللغة الإنجليزية وموجه أساساً إلى المتخصصين والدارسين . وقد نشر لى كتاب عام ١٩٧١ فى الإلكترونيات باللغة الإنجليزية ، ولكنه كان أيضاً موجه للدارسين المتخصصين . مع عظيم احترامنا لهذه المراجع العالمية التي لا غنى عنها وبها تعلمنا ، فإننا ينقصنا تواجد مراجع علمية مبسطة أو متعمقة نابعة من عقول عربية بلسان عربي للقارئ العربى ، ولا تعتمد فقط على الترجمة . ولعل الحاجة ملحة فى البداية للمؤلفات العلمية المبسطة التى تجمع بين السهولة فى العرض والدقة فى التعبير والوضوح فى المفاهيم بحيث يكون جهد القارئ وتعمقه مستقبلاً استكمالا وليس إحلالا .

من هنا جاءت فكرة هذا الكتاب بعنوان «رحلة فى هندسة الإلكترونيات» بهدف تقديم أبعاد وعموم المفاهيم الإلكترونية للقارئ العربى بصورة مبسطة دون الإخلال بدقة وأساسيات تلك المفاهيم .

هذا الكتاب موجه لقطاع عريض من القراء على اختلاف ثقافاتهم ، على أمل أن يجد فيه كل قارئ ما يجذبه ويرضيه بصورة أو أخرى . فهو موجه إلى :

١- القارئ المثقف الذى يريد أن يعرف ويستنير أكثر .

٢- طلبة المستوى الثانوى والجامعى ، وخاصة من سيتأهلون لدراسة العلوم والإلكترونيات . فهذا الكتاب بالنسبة لهم يشبه المسح الجوى لموقع ما لاكتشاف تضاريسه وأبعاده قبل النزول إلى الموقع نفسه لدراسة تفاصيله وخباياه .

٣- الزملاء المتخصصين فى مجالات علمية أخرى ، لتبادل المعلومات ، على أمل أن نصاحبهم فى رحلات مشابهة فى تخصصاتهم .

٤- الزملاء المتخصصين فى الإلكترونيات ، لتبادل الرأى ، والتعاون على تحمل المسئولية فى نشر الوعى فى تخصصنا على كافة المستويات .

لقد تعمدت استعمال كلمة رحلة حيث كان فى نيتى منذ البداية الاكتفاء بالنص دون اللجوء إلى معادلات رياضية أو رسومات توضيحية أو بيانية ، خوفا من أن يكون فى ذلك عائق أمام القارئ غير المتخصص . ولكنى اكتشفت أن الالتزام بذلك قد يعقد الأمور أحياناً بدلاً من أن يسهلها . لذلك ، في الحالات القليلة التى لجأت فيها مضطراً إلى المعادلات والرسومات ، حاولت قدر المستطاع أن تكون بسيطة للغاية بحيث يسهل على القارئ المتوسط متابعتها . هذا ، علاوة على أن تسلسل العرض معد بحيث إذا صعب على أحد متابعة بعض المعادلات أو الرسومات ، فإن النص كاف لاستمرارية المفاهيم .

التعرض لتقديم موضوع متسع ومتشعب كالإلكترونيات بطريقة مبسطة للقارئ العادى ، وفى نفس الوقت مقنعة للقارئ المتخصص ، ليس بالأمر الهين . كما أنه ، مهما أطلنا ، فإننا لن نستطيع تغطية جميع أنهر هذا العلم وروافده . لذلك ، كان لابد من الاختيار . من الطبيعى فى الاختيار أن يكون الاهتمام بالأساسيات والمفاهيم . حتى فى هذه الحدود يلزم الحرص فيما يتم اختياره وما يستبعد . لتصميم كتاب بهذه المواصفات ، هناك مئات من الطرق الممكنة ، وعشرات من الطرق الجيدة التى يعتمد الاختيار بينها على عديد من العوامل . وكل ما يأمله المؤلف أن يكون الطريق الذى يسلكه ليس بعيداً عن الأمثل .

هناك أربع كلمات إنجليزية تتكرر كثيراً ، خاصة فى تخصص هندسة وعلوم الحاسب ، لم يتفق على مقابل لها باللغة العربية . هذه الكلمات هى "Software, Hardware, Firmware, Bit" . كثيراً ما تترجم الكلمة الأولى «برمجيات» ، أما الثلاث كلمات الأخرى فمتروكة للتقدير الشخصى حسب سياق النص . أقدم فى هذا الكتاب اقتراحا بأربع مقابلات عربية لهذه الكلمات قد تبدو لأول

وهلة أنها مفاجئة وغير معتادة . إلا أنها ، مع الاستعمال والثقة فى النفس ، يمكن تعودها . هذه المقابلات هى : «مهمات خلفيه – Software » ، «مهمات ملموسة – Hardware » ، وبما أن الثالثة عبارة عن مهمات خلفية موجهة لتطبيقات خاصة ومثبته فى مكونات ملموسة لتحصينها ضد التدخل ، فإن المقابل المقترح هو «مهمات ثابتة – Firmware » . وبما أن الكلمة الرابعة "Bit" عبارة عن مكان يمثل تواجد النبضة فيه "1" وعدم تواجدها "0" ، فالمقابل المقترح لها هو «مك – bit » ومجموعها «ماك – bits » ، فنقول مثلاً «كيلوماك – Kilobits » ، «ميجاماك – Megabits » ، وهكذا . هذه مقترحات استعملتها في هذا الكتاب ، والرأى فى النهاية للزملاء فى التخصص .

يتكون الكتاب من ستة أبواب وخاتمة . تم ترتيب الأبواب بحيث يبنى كل باب على ما قبله ويمهد لما هو قادم . وبما أن الرجوع إلى الجذور دائما مفيد ، ويعطى راحة للنفس وعمقاً فى الرؤية ، فقد أقصرت الباب الأول على مراجعة تاريخية ، قد يرى البعض أنها اختصار مخل ، وقد يرى أخرون أنها إسهاب ممل . ولكننى أخذت طريقاً وسطا آملا أن يفى بالغرض ، ويحظى بالقبول .

وبالله التوفيق ، **المؤلـف**

١- مراجعة تاريخية

١/١ المعارف البشرية

منذ أن أخرج الله آدم وزوجه من الجنة وأسكنهما الأرض كما جاء فى الآية الكريمة رقم ٣٦ من سورة البقرة ﴿ فَأَزَلَّهُمَا الشَّيْطَانُ عَنْهَا فَأَخْرَجَهُمَا مِمَّا كَانَا فِيهِ وَقُلْنَا اهْبِطُوا بَعْضُكُمْ لِبَعْضٍ عَدُوٌّ وَلَكُمْ فِي الأَرْضِ مُسْتَقَرٌّ وَمَتَاعٌ إِلَىٰ حِينٍ ﴾، منذ تلك البداية، والإنسان يكافح . بدأ الكفاح قديما بالفطرة ، ثم بالخبرة ، والآن بالخبرة والعلم معا . كافح الإنسان ، ومازال يكافح ، على ثلاث جبهات هى : صراع مع الطبيعة لتيسير معيشته ، وعداء مع بنى جنسه بسبب المنافسة ، وأخطار إغواء الشيطان .

استعان الإنسان فى صراعه مع الطبيعة بالمشاهدة والمؤثرات التى تعتمد أساساً على الحواس ، والتجربة التى تعتمد على المهارة ، والاستنتاج الذى يعتمد على العقل . تبلور هذا حثيثاً إلى صياغة وتطور علوم الفلسفة والرياضيات والطبيعة والكيمياء التى هى أسس العلوم الحديثة .

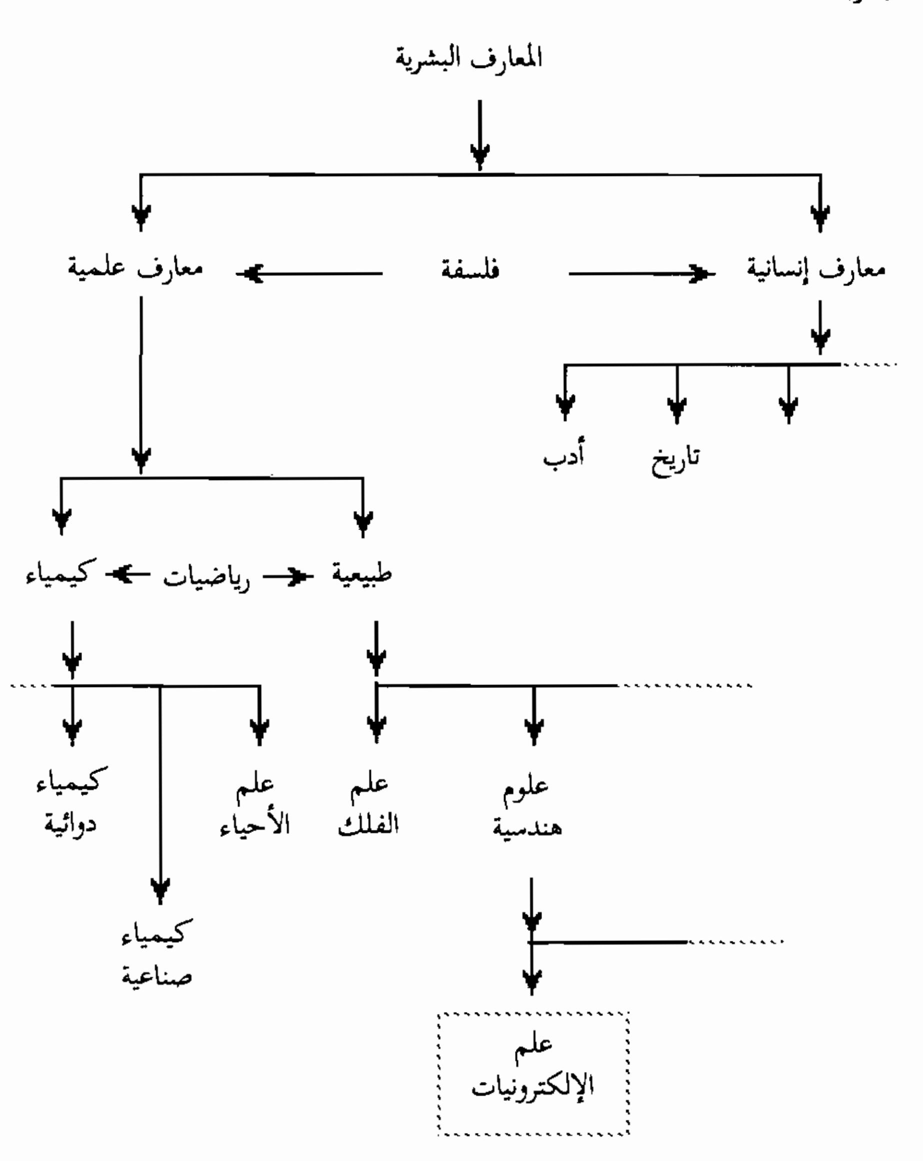
أدى عداء الإنسان مع بنى جنسه إلى حروب بدائية قديمة ، تطورت آلياتها مع الزمن والتقدم العلمى حتى وصلت إلى ما نراه اليوم من علوم ومعدات عسكرية حديثة.

كان لإغواء الشيطان أثره فى انحراف المجتمعات وظهور الأنبياء والرسل لإصلاح المسارات . وما أنزل من كتب مقدسة ، وما لازمها من تفسيرات وأحاديث وغير ذلك ، يقع حاليا تحت مظلة العلوم الدينية .

لازم كل هذا تطورات فى المعارف البشرية بقسميها الإنسانى والعلمى على مدى السنين والقرون . تشمل المعارف الإنسانية اللغات والأدب والتاريخ وما شابه ذلك ، وتشمل المعارف العلمية الطبيعية والكيمياء بأفرعها المختلفة . وحلقة الربط بين المعارف الإنسانية والمعارف العلمية هى الفلسفة التى تعتبر من أقدم اهتمامات البشر والمغذية لباقى المعارف .

تختص العلوم الطبيعية بدراسة الكون ومكوناته كما هو قائم دون التعرض لتغيير المادة ، من أمثلة ذلك علم الفلك والعلوم الهندسية . تختص العلوم الكيميائية بدراسة تغيير المواد سواء تلقائيا مثل علم الأحياء ، أو بتدخل الإنسان مثل تحضير المركبات الكيميائية لأغراض الصناعة والدواء . وحلقة الربط بين العلوم الطبيعية والعلوم الكيميائية تتمثل فى علم الرياضيات الذى يستعمل للتحليل والاستنتاج . علم

الإلكترونات ، الذى نحن بصدده ، ينتمى إلى العلوم الطبيعية التى تنتمى إلى مجمل المعارف البشرية . يوضح الشكل (١-١) موقع علم الإلكترونيات على خريطة المعارف البشرية .



شكل (١-١) : علم الإلكترونيات على خريطة المعارف البشرية.

٢/١ تطور المعارف العلمية

بدأ الإنسان نشاطه على الأرض بردود فعل فطرية لتلبية احتياجاته المباشرة والملحة كى يصمد فى الحياة فى مواجهة مناخ وتضاريس قاسية . ثم اكتشف لغة الحديث للاتصال بمن حوله ، ولغة الأرقام والرموز لتقييم ومقارنة ما يتداوله من ماديات . بدأت المعارف المسجلة مع الحضارات المؤرخة التى تتابعت ابتداء من الحضارة المصرية القديمة حتى ٧٠٠ قبل الميلاد (ق.م) ، مرورا بالحضارة الإغريقية من ٧٠٠ – ١٠٠ ق.م ، ثم

الحضارة الرومانية من ١٠٠ ق.م – ٤٠٠م، والحضارة الإسلامية من ٤٠٠ – ١٠٠٠م، ثم النهضة الأوروبية ابتداء من ١٠٠٠م ، تقريباً .

تعتبر الفلسفة من أقدم المعارف البشرية ، والمغذى الرئيسى لما جاء بعدها . ويعتبر فلاسفة الإغريق من أشهر الفلاسفة فى التاريخ وفى مقدمتهم سقراط – Socrates (٤٧٠ – ٣٩٩ ق.م) ، وبلاتو – Plato (٤٢٨ – ٣٤٧ ق.م) ، وأرسطو – Aristo-tle (٣٨٤ – ٣٢٢ ق.م) . وكان من أولويات اهتماماتهم شرح وتحليل ما يشاهدونه فى السماوات والأرض . ورغم أن ما قدموه من شرح وتحليل كان بعيدا عن الحقيقة ، إلا أنه أثار جدالات ساخنة على مر القرون مما أدى فى النهاية إلى الحقيقة ، أو ما نتخيله حاليا أنه الحقيقة . فمثلا كانت مدرسة أرسطو تعتنق مبدأ أن الأرض ثابتة وتمثل محور الكون تدور حولها باقى الأجرام بما فيهم الشمس . استمر هذا المفهوم إلى أن تم تصحيحه فى عصر النهضة الأوروبية على أيدى علماء من أشهرهم كيبلر – Kepler (١٥٧١ – ١٦٣٠م) فى ألمانيا ، وجاليليو – Galileo (١٥٦٤ – ١٦٤٢م) فى إيطاليا ، ونيوتن – Newton (١٦٤٢ – ١٧٢٧م) فى إنجلترا .

ومن أقدم المعارف أيضا الكيمياء . كانت المدرسة القديمة من حوالى ٥٠٠ ق.م حتى القرن السابع عشر الميلادى تحدد المواد الأولية بأربعة عناصر هى النار والهواء والماء والأرض ، ومنها تتكون جميع المواد الأخرى بالخلط والاندماج . استمرت الكيمياء تحت مسمى «الفن السماوى – Divine art » إلى أن تغير المسمى إلى «كيميا – Chemeia » فى حوالى ٢٥٠م ، وهو اسم مستنبط من كلمة مصرية قديمة «كيمى – Chemi » بمعنى أسود أو محروق . كان التطور فى الكيمياء حتى مع بداية النهضة الأوروبية يهدف أساسا إلى تحقيق هدفين ألهبا الخيال فى ذلك الحين ، وهما التوصل إلى تحويل المواد إلى ذهب فيما يعرف «بحجر الفلاسفة – The Philosopher's Stone » (حوالى ١٢٠٠م) ، وإطالة العمر فيما يعرف «بأكسير الحياة – Elixir of Life » (حوالى ١٥٢٥م) . شارك قدماء المصريين ومن بعدهم الإغريق فى تطور علم الكيمياء قبل الميلاد . انتقل التطور بعد ذلك واستمر بمدينة الإسكندرية إلى أن شارك العرب بعد فتح مصر فى ٦٤٠م فى هذا التقدم بترجمة كتب الإغريق إلى العربية وظهور علماء عرب فى العلوم والكيمياء من أشهرهم جابر بن حيان (٧٤٠ – ٨١٣م) وابن سينا (٩٨٠ – ١٠٣٧م) . ثم وصلت الكيمياء إلى أوربا فى العصور الوسطى بترجمة الكتب العربية فى أسبانيا إبتداء من ١١٠٠م .

يعتبر روبرت بويل – Robert Boyle (١٦٢٧ – ١٦٩١م) أول مفكرى الكيمياء الحديثة بعيدا عن حجر الفلاسفة وأكسير الحياة اللذين ثبت بطلانهما . تلى

ذلك تعريف أدق للعناصر ، وإحياء فكرة الذرة التى تبناها أصلا بعض فلاسفة الإغريق حوالى ٥٠٠ ق.م فى مقابل فكرة مضادة تبناها آخرون وهى التركيب الجيلاتينى للمواد .

٣/١ الطريق إلى الذرة

كلمة ذرة تعريب للكلمة الإنجليزية Atom ، وهذه مشتقة من الكلمة الإغريقية Atomos ومعناها غير قابل للتقسيم . منذ ٥٠٠ ق.م تعرض فلاسفة الرومان لكيفية التركيب الداخلى للمواد . كان هناك من تبنوا فكرة أن المواد مستمرة فى تركيبها وتملأ الفراغ الذى تشغله بأكمله دون فجوات كما يملأ الجيلى أى وعاء . وآخرون تبنوا فكرة أن المواد تتكون من جسيمات صغيرة (ذرات) بينها فجوات ومتماسكة بطريقة أو أخرى حسب صلابة المادة . هذه طبعا كانت آراء فلسفية لا تعتمد على أسس أو تجارب علمية . استمر الحال كذلك حتى عصر النهضة الأوربية حيث تجمع مخزون من الشواهد والتجارب يرجح التركيب الذرى للمادة . من ذلك :

أ – لتر ماء + لتر كحول يعطى أقل من ٢ لتر خليط .

ب– إمكان إمرار الماء بالضغط (نز أو رشح – ooze) خلال شريحة رقيقة من الذهب.

جـ– قابلية الغازات للتضاغط وشغل حيز أقل .

د – تتكون المركبات الكيميائية باتحاد العناصر بنسب وزنية ثابتة وبسيطة ، مما يوحى بأن الاتحاد يحدث بين عدد معين من جسيمات دقيقة من كل عنصر .

هـ– استطاع العالم الإنجليزى أسحق نيوتن (١٦٤٢ – ١٧٢٧م) ، باستعمال افتراض التركيب الذرى للغازات ، أن يثبت نظريا القوانين التجريبية التى حصل عليها روبرت بويل وغيره للعلاقة بين حجم وضغط ودرجة حرارة الغازات .

كل هذه التجمعات وغيرها من الروافد ، أدى إلى تقديم نظرية ذرية واضحة ومقنعة وجديرة بالمتابعة ، يعود الفضل فيها إلى العالم الإنجليزى جون دالتون – John Dalton (١٧٦٦ – ١٨٤٤م) . ففى حوالى عام ١٨٠٣م حدد دالتون النظرية الذرية كمايلى :

أ – تتكون العناصر الكيميائية من جسيمات صغيرة (ذرات) تحتفظ كل منها بالخواص الكيميائية للعنصر .

ب– الذرة غير قابلة للانقسام .

جـ– ذرات العنصر الواحد متشابهة فى جميع الخواص ومن بينها الكتلة أو الوزن – وذرات العناصر المختلفة لها أوزان مختلفة ، ويمكن توصيف العناصر بوزنها الذرى .

د - بما أن الأوزان المطلقة للذرات ضئيلة للغاية ، فقد اتجه دالتون للأوزان النسبية ، متخذا ذرة الهيدروچين التى هى أخف الذرات كوحدة .

رغم أن نظرية دالتون الذرية تعتبر الموجه الأساسى للكيمياء الحديثة ، إلا أنها لم تخلو من قصور تم تصويبها فى أزمنة لاحقة . فمثلا ، البند « أ » أثبت صلاحيته ولم يحدث فيه تعديل . البند «ب» غير صحيح كما نعرف اليوم من انشطار الذرة . البند «جـ» غير دقيق بسبب ظهور ذرات من العنصر نفسه بأوزان مختلفة فيما يعرف حاليا بالنظائر – Isotopes مما تسبب فى الإلتجاء إلى الرقم الذرى بدلا من الوزن الذرى فى توصيف العناصر . البند « د » صحيح كمبدأ ، ولكن دالتون لم يستطع الوصول إلى الأوزان المطلقة للذرات أو حتى إلى أوزانها النسبية لعدم معرفته عدد ذرات كل عنصر فى المركب . كذلك فإن دالتون أطلق على تجمع ذرات العناصر فى المركب «الذرة المركبة» ، ولم يعترف بمثل هذا التجمع بين ذرات العنصر الواحد . وقد تم تصحيح ذلك فيما بعد وبصفة خاصة عام ١٨١١ على يد العالم الإيطالى أفوجادرو – Avo-gadro (١٧٧٦ – ١٨٥٦م) بإطلاق كلمة جزئ – Molecule (بمعنى كتلة صغيرة) على تجمع ذرات العناصر المختلفة فى المركب ، وأيضا فى تجمع ذرات متشابهة فى بعض العناصر ، وحتى على الذرة الواحدة فى العناصر الخاملة ، سميت على التوالى جزئ متعدد الذرات ، وجزئ ثنائى الذرات ، وجزئ أحادى الذرات .

٤/١ الطريق إلى الإلكترون

لم تكن ذرات دالتون نهاية المطاف ، ولكنها كانت خطوة هامة لما هو أهم . فرسوخ فكرة التكوين الذرى للمواد ، ومواكبة ذلك مع نجاحات عديدة فى فروع علمية أخرى ، أوقد حماس الباحثين وزاد من سرعة التطور العلمى بصفة عامة .

أما الطريق إلى الإلكترون فقد اتخذ مسارين متوازيين أحدهما كيميائى بدأ مع اكتشاف الذرة ، والثانى كهربى بدأ بمشاهدات قديمة ترجع جذورها إلى أوائل العهد الإغريقى حوالى ٦٠٠ ق.م . أول علامة مميزة على المسار الكيميائى حدثت عام ١٨٦٩م حينما قدم العالم الروسى مندليف – Mendeleeff (١٨٣٤ – ١٩٠٧م) الجدول الدورى للعناصر ، حيث رتب فيه العناصر تصاعديا حسب أوزانها الذرية ، ولاحظ تكرار تشابه الخواص الكيميائية كل ثمانية عناصر . أو حى ذلك أن الذرة ليست كتله صماء كما اعتقد دالتون ، بل لها تركيب داخلى مسئول عن هذه الظاهرة . كذلك ، فى سياق دراسة التحليل الكهربى للمحاليل الكيميائية بواسطة العالم البريطانى مايكل فاراداى – Michael Faraday (١٧٩١ – ١٨٦٧م) ، وجد أن مرور التيار الكهربى فى المحلول يتم بواسطة أيونات تحمل شحنات كهربية سالبة وموجبة . ووجد أن الشحنات على الأيونات الأحادية التكافؤ ثابتة دائما ، والشحنات

على الأيونات المتعددة التكافؤ مرتبطة ببعضها بمضروب بسيط وصحيح . كان الاستنتاج من ذلك أن الشحنات الكهربية لها حد أدنى ، وأن الشحنات الكهربية عامة تساوى مضروباً بسيطاً وصحيحاً لهذا الحد الأدنى . فى عام ١٨٧٤م استطاع عالم يدعى ستونى – Stony حساب قيمة تلك الشحنة التى تمثل الحد الأدنى بمقدار ١,٥٩٢ × ١٠^-١٩^ كولوم وهى ، كما سنرى فيما بعد ، قيمة على درجة كبيرة من الدقة ، وأطلق عليها اسم «إلكترون» .

على المسار الكهربى ، ظهر الإلكترون متخفيا دون أن يشعر به أحد منذ التاريخ الإغريقى القديم (حوالى ٦٠٠ ق.م) ، حيث كان معروفا فى ذلك الزمن البعيد أن تدليك الكهرمان – Amber بالصوف يجعله يجذب الأجسام الخفيفة . ثم تكررت الظواهر بتدليك الزجاج بالحرير والمطاط بالفرو ، وهكذا . وبصفة عامة لوحظ أن الاحتكاك بين الأجسام يعطيها خاصية التجاذب والتنافر والقدرة على جذب الأجسام الصغيرة . ومن الكلمة الإغريقية "Elecktron" ، ومعناها كهرمان – Amber ، اشتقت كلمة "Electricity" لتعريف هذه الظواهر . استمرت هذه المشتقات مستعملة فى العلوم الكهربية حتى يومنا هذا . كان تعليل هذه الظواهر أن الأجسام نتيجة التدليك أو الاحتكاك تحمل شحنات كهربية ، لا تعرف هويتها ، ساكنة (إستاتيكية) ، سالبة أو موجبة حسب أنواع المواد المستعملة فى التدليك أو الاحتكاك . تجذب هذه الأجسام المشحونة الأجسام الخفيفة غير المشحونة ، بينما تتجاذب الأجسام المختلفة الشحنة وتتنافر الأجسام المتشابهة الشحنة . كذلك البرق ، الذى كان الناس قديما يعتبرونه غضبا عليهم من الآلهه ، أثبت العالم ورجل الدولة الأمريكى بنجامين فرانكلين – Benjamin Franklin (١٧٠٦ – ١٧٩٠) أنه تفريغ كهربى بين السحب بعد أن شحنت كهربيا لدرجة عالية نتيجة احتكاكها بالهواء . وقد حصل فرانكلين على هذه النتيجة بتجربته المشهورة عام ١٧٥٢م التى استعمل فيها الطائرة الورقية (Kite) التى يستعملها الأطفال فى اللعب والترفيه . استمر الاهتمام بالكهربية الإستكاتيكية ، وتم بناء أجهزة لشحن الأجسام وقياس هذه الشحنات ، وقياس قوة الجذب والتنافر بين الأجسام المشحونة ، وتوليد الشرارات ومحاولة الاستفادة منها .

فى عام ١٧٨٤م قدم العالم الفرنسى شارلز كولوم – Charles Coulomb (١٧٣٦ – ١٨٠٦) قانونه المشهور فى الكهربية الإستاتيكية الذى يحدد أن قوة الجذب أو التنافر بين شحنتين كهربيتين تتناسب مع حاصل ضرب قيمتها مقسوماً على مربع المسافة بينهما . بهذا القانون بدأت الدراسات والأبحاث الكمية وتطورت الكهربية كعلم حقيقى . كانت الكهربية حتى هذا التاريخ أساساً إستاتيكية فيما عدا لحظات التفريغ حيث يمر تيار على شكل شرارة فى الهواء أو نبضة فى موصل . وكان الوضع فى

حاجة ماسة إلى طريقة ما للحصول على تيار كهربى مستمر ، وليس مجرد شرارات فى الهواء أو نبضات لحظية فى موصل . تحقق هذا عام ١٨٠٠م على يد العالم الإيطالى ألكسندر فولتا – Alessandro Volta (١٧٤٥ – ١٨٢٧) بإيحاء من مشاهدة جلفانى – Galvani المشهورة عام ١٧٨٩م أثناء تشريحه لضفدعة . استطاع فولتا عام ١٨٠٠م بناء بطارية كيميائية كمصدر للجهد الكهربى قادرة على إمرار تيار مستمر فى دائرة موصلة مغلقة . أدخل على بطارية فولتا تحسينات عديدة بعد ذلك من أهمها دانيال – Daniell ولاكلانشيه – Laclanche . أدى الحصول على تيار مستمر إلى قفزات هائلة فى علم الكهرباء ، وخاصة على أيدى علماء مثل أمبير – Ampere ، وأورستيد – Oersted ، وأوم – Ohm ، وفارادای – Faraday وغيرهم . ولا مجال للتعرض لهذه التفاصيل هنا حيث إنها خارج نطاق مسار اهتمامنا فى رحلتنا الحالية .

كان الحصول على التيار المستمر حدثا وإنجازا مبهرا بقياس ذلك الزمان . وانهمك العلماء فى استخدام هذا لتيار فى التجارب والاستنتاجات النظرية . ما يهمنا هنا من هذه الاستنتاجات هو تصنيف المواد بأوجهها الثلاثة ، جامدة وسائلة وغازية ، إلى مواد موصلة للتيار الكهربى ومواد غير موصلة أو عازلة . بالنسبة للتوصيل فى الجوامد ، كان قانون أوم المشهور من أهم الاستنتاجات ، وهو ينص على أن التيار الكهربى المار فى موصل يتناسب مع الجهد بين طرفيه . وكان التوصيل فى السوائل أحد أنشطة فارادای التى تبلورت فى قانونى فارادای للتحليل الكهربى . أما التوصيل فى الغازات ، وهو ما يهمنا هنا ، فقد بدأ بدراسة التوصيل الكهربى فى غاز داخل أنبوبة زجاجية محكمة الإغلاق ، بطرفيها قطبين معدنيين بينهما جهد كهربى . يسمى أحد هذين القطبين «الكاثود» وهو المتصل بالطرف السالب للجهد ، ويسمى القطب الآخر «المصعد» وهو المتصل بالطرف الموجب للجهد . بتوصيل جهد بين القطبين ، وعند ضغط معين للغاز ، يمر تيار كهربى مصحوبا بتوهج ، ويسمى هذا بالتفريغ الغازى Gas Discharge . بتخفيض ضغط الغاز داخل الإنبوبة يزداد التيار الكهربى مع زيادة فى التوهج الذى يملأ فراغ الأنبوبة تقريبا ، ويصل هذا مداه عند ضغط معين للغاز . مع الاستمرار فى تخفيض ضغط الغاز يعود التيار والتوهج إلى النقصان حتى يختفيا . أى إن هناك ضغطاً معيناً للغاز يعطى أقصى قيمة للتيار الكهربى مصحوبا بأقصى درجة للتوهج . المهم هنا ، أنه عند تفريغ الأنبوبة الزجاجية تماماً من الغاز ، شوهدت ظاهرة غريبة كان لها أهمية عظيمة . ذلك أنه رغم اختفاء التوهج فى فراغ الأنبوبة ، إلا أنه لوحظ وجود توهج خفيف فى الجزء الزجاجى المقابل للمهبط ، ويمكن زيادة وضوح هذا التوهج بطلاء ذلك الجزء الزجاجى بمادة فوسفورية . ثبت أن هذا نتيجة شعاع ، غير معروف الهوية ، قادم من المهبط . لذلك أطلق عليه اسم شعاع المهبط –

Cathode Ray . انشغل عديد من الباحثين فى محاولات التعرف على هذا الشعاع ، وكان من البارزين فى هذا المضمار العالم الإنجليزى وليم كروكس – William Crookes (١٨٣٢ – ١٩١٩) . أثبت الباحثون عديداً من الخصائص لشعاع المهبط، من أهمها :

أ – أنه يسير فى خط مستقيم عمودى على سطح المهبط .

ب– ثبت بالتجربة أن له طاقة حرارية وطاقة ميكانيكية .

جـ– يمكنه اختراق شرائح رقيقة من المعدن .

د – لا يمكنه اختراق الشرائح السميكة ، حيث يلقى بظلها على الناحية المتوهجة من الزجاج .

هـ– ينحرف الشعاع إذا ما سلط عليه مجال مغناطيسى عمودى على مساره .

و – ينحرف أيضا إذا ما سلط عليه مجال كهروستاتيكى عمودى على مساره .

ز – يحمل الشعاع شحنة سالبة .

كان هذا هو الموقف بالنسبة لشعاع المهبط حينما بدأ العالم الإنجليزى تومسون – J. J. Thomson (١٨٥٦ – ١٩٤٠) الاهتمام بالموضوع . لذلك كان من الطبيعى أن يبدأ تومسون بافتراض أن الشعاع يتكون من جسيمات دقيقة – Corpuscles تحمل شحنات سالبة ، أطلق عليها الاسم «إلكترون» فيما بعد . آل تومسون على نفسه مهمة اكتشاف حقيقة هذه الجسيمات ، حيث استغل خاصية انحراف الشعاع فى المجالين المغناطيسى والكهروستاتيكى ، وتمكن فى عام ١٨٩٦م من حساب نسبة شحنة هذا الجسيم الدقيق إلى كتلته (q/m) . فى عام ١٩١١ تمكن العالم الأمريكى ميليكان – Millikan (١٨٦٨ – ١٩٥٣) من حساب قيمة دقيقة للشحنة الكهربية على جسيم تومسون الدقيق أو الإلكترون "q" ، ومنها قيمة كتلته "m" ، وكانت النتائج كمايلى :

- كتلة الإلكترون "m" = ٩,١ × ١٠^-٣١ كيلو جرام
- شحنة الإلكترون "q" = ١,٦ × ١٠^-١٩ كولوم

ويلاحظ التقارب الشديد بين هذه القيمة لشحنة الإلكترون وتلك التى توصل إليها ستونى من المسار الكيميائى .

٥/١ التركيب الذرى

ظهور الإلكترون على أنه جسيم دقيق منبعث من مادة الكاثود فى تجارب التفريغ

الكهربى فى الغازات ، يدل على أنه نابع من ذرات تلك المادة . وثبات خواصه ومواصفاته مهما تغيرت مادة الكاثود ، يدل على أن الإلكترون جسيم أساسى فى تركيب ذرات المواد المختلفة . هذا ، مع جدول مندليف الدورى للعناصر ، يوحى أن الذرة ليست صماء ، ولكن لها تركيباً ما داخلياً له أيضا صفة الدورية . وما دام هذا التركيب يحتوى على جسيمات سالبة (إلكترونات) فلابد وأنه أيضاً يحتوى على جسيمات موجبة ، حيث إن أى ذرة فى مجملها متعادلة كهربيا . تأكد هذا الإيحاء حينما كشفت الذرة تلقائيا عن أسرارها فيما يعرف بالمواد المشعة . فكما تكشف الأرض عما فى جوفها من حين لآخر بحمم البراكين التى تقذفها نتيجة انفجارات تلقائية داخلها ، كذلك تكشف بعض الذرات ، وخاصة الثقيلة منها ، عما فى جوفها من حين لآخر بإطلاق إشعاعات نتيجة إنفجارات تلقائية داخلها . تم اكتشاف ذلك بطريق الصدفة حينما لاحظ كل من العالم بيكيريل – Becquerel عام ١٨٩٦م والعالمة مدام كورى – Curie عام ١٨٩٨م أن بعض مركبات اليورانيوم والثوريوم تؤثر فى الألواح الفوتوغرافية الحساسة رغم حماية هذه الألواح داخل أغلفة سوداء محكمة. تطورت الأبحاث فى هذا الاتجاه إلى اكتشاف عنصر الراديوم المشع عام ١٩١٠م على يد مدام كورى والعالم ديبرن – A. Debierne . وقد وجد أنه ينبعث من الراديوم ثلاثة أنواع من الأشعة : النوع الأول ، ويعرف بأشعة آلفا – α-rays ، يتكون من جسيمات موجبة الشحنة فى وزن ذرة الهيليوم . النوع الثانى ، ويعرف بأشعة بيتا – β-rays ، يتكون من إلكترونات مثل أشعة المهبط غير أن سرعة الإلكترونات فيها أعلى كثيرا لدرجة أنها قادرة على اختراق رقائق من الألومنيوم . والنوع الثالث ، ويعرف بأشعة جاما – γ-rays ، أشعة كهرومغناطيسية مثل الضوء وأشعة إكس غير أن طاقتها أشد لدرجة أنها قادرة على اختراق عدة سنتيمترات من الرصاص .

وسط هذه الأجواء العلمية المثيرة والواعدة ، لاحظ العلماء ظاهرة مهمة كان لها تأثير حاسم على حقيقة تركيب الذرة . ذلك ، أنه كان من المعتاد فى تلك الآونة مشاهدة وتصوير مسار أشعة آلفا عند مرورها فيما يعرف بالغرف السحابية – Cloud Chambers ، وهى أوعية زجاجية تحتوى على غاز رطب . لوحظ فى هذه التجارب أن «أشعة آلفا» تمر عادة فى الغاز كالرصاصة المندفعة فى خط مستقيم ، فيما عدا أنها على فترات متباعدة يحدث لها انحراف شديد ومفاجئ يصحبه انحراف لجسيم آخر فى الاتجاه المعاكس . كان تعليل هذه الظاهرة أنه يوجد فى ذرات الغاز جسيمات موجبة الشحنة حجمها ضئيل للغاية بالنسبة لحجم الذرة لدرجة أن «شعاع ألفا» يقترب منها فقط على فترات متباعدة . وبما أن «شعاع ألفا» مكون من جسيمات موجبة ، فإنه يتنافر مع هذه الجسيمات الذرية الافتراضية ، وينحرف كل منهما فى اتجاه مضاد .

أدت هذه المشاهدات وغيرها إلى قناعة العلماء بأن الذرة تتكون من نواة موجبة الشحنة ، متناهية فى الصغر ، يتركز فيها معظم الوزن الذرى ، وتسبح حولها سحابة من الإلكترونات السالبة الشحنة على مدى فراغ الذرة بحيث تكون الذرة فى مجملها متعادلة كهربياً .

نتيجة لكل ما سبق ، وفى عام ١٩١١م ، قدم العالم النيوزيلاندى إرنست رذرفورد Ernest Rutherford – (١٨٧١ – ١٩٣٧) أول افتراض مقبول للتركيب الذرى . فقد قدم تصوره بأن التركيب الذرى مشابه للمجموعة الشمسية ، حيث تدور الإلكترونات فى مدارات حول النواة . وأن المدار الخارجى يحدد قطر الذرة المقدر بحوالى ١٠$^{-٨}$ سم ، بينما قطر الإلكترون وقطر النواة يقدر بحوالى ١٠$^{-١٣}$ سم . من هذا يتضح أن الذرة فى أغلبها فراغ ، وتشغل جسيمات النواة والإلكترونات جزءاً ضئيلاً جدا من حجمها . ولتوضيح ذلك ، نفترض جدلا أن قطر الذرة ١٠٠ متر فإن قطر النواة يكون ١ ملليمتر ، وكذلك قطر الإلكترون . كذلك ، فإن النواة تتكون من جسيمات موجبة الشحنة تسمى بروتنز – Protons عددها يساوى الرقم الذرى للعنصر ، وعدد من الجسيمات المتعادلة تسمى نيوترونز – Neutrons مسئولة عن وجود النظائر للعنصر الواحد (Isotopes) . فى عام ١٩١٣م ، وعلى هدى افتراض رذرفورد للتركيب الذرى ، قدم العالم الهولندى نيلز بور – Niels Bohr (١٨٨٥ – ١٩٦٢) نظريته لذرة الهيدروچين المكونة من نواة بها بروتون واحد يدور حولها إلكترون واحد ، وبها أثبت نظريا العديد من الحقائق المعملية التى كانت غامضة ، وخاصة فيما يتعلق بالإشعاع الطيفى للهيدروچين .

والآن ، بعد هذا العرض التاريخى الموجز ، وقبل أن نبدأ رحلتنا فى هندسة الإلكترونيات ، يلزم أن نتفق على بعض المفاهيم الأساسية للمقادير الطبيعية ، والرموز والوحدات المستعملة فى عالم الإلكترونيات .

٢- مفاهيم أساسية

١/٢ مقدمة

واضح أن العلم ، مهما تقدم وأنجز ، فهو مبنى على افتراضات وليس على حقائق مطلقة . فالحقيقة المطلقة لا يعلمها إلا الله . وهناك على مدى التاريخ الكثير من الافتراضات العلمية التى فشلت ، فتلاشت واندثرت ، ولم تصمد سوى الافتراضات التى حققتها التجارب . وإذا استجدت مشاهدات أو نتائج معملية مؤكدة تتعارض مع افتراض معين ، فإما أن يعدل هذا الافتراض ليتواءم مع تلك المشاهدات والنتائج ، أو يلغى كلية لصالح افتراض آخر جديد ، وهكذا .

كانت العلوم القديمة تعتمد على توصيف المقادير الطبيعية والمقارنة بينها لغوياً ، ولـم تكن تتعرض للتحـديد الرقمى لتلك المقادير . ومع ظهور القوانين الفرضية الأساسية ، مثل قوانين نيوتن فى الميكانيكا الكلاسيكية وقانون كولوم فى الكهربية الإستاتيكية ، والقوانين المشتقة منها ، لزم التحديد الرقمى للمقادير الطبيعية المرتبطة بتلك القوانين . يحتاج التحديد الرقمى للمقادير إلى وحدات قياسية معترف بها على الأقـل مـن غالبية مـن يهمهـم الأمـر ، منعاً لتعقيد الأمور . أدى هذا إلى توارد أفكار الوحـدات والمعايير ، التى تطورت إلى النظام الدولى للوحدات الجارى العمل به حالياً .

كذلك ، للطاقة والإشعاع أهمية كبيرة فى ديناميكية الجسيمات داخل الذرات والمواد . وهذا يستلزم التعرف على الأقل على الحد الأدنى عن ماهية الطاقة والإشعاع، كى تسهل المتابعة عند استخدام هذه المفاهيم فيما هو قادم .

٢/٢ النظام الدولى للوحدات - International System of Units (SI)

كان واضحاً أن هناك وحدات أساسية تخضع للاختيار الحر ، ومنها تستنتج باقى الوحدات غير الأساسية باستعمال القوانين التى تحدد العلاقات بينها . الوحدات الأساسية هى الطول – L والكتلة – M والزمن – T فى دراسات الميكانيكا الكلاسيكية، تضاف إليها الشحنة الكهربية – Q فى الدراسات الكهربية . كما هو الحال دائما ، اتخذ تعريف الوحدات مسارا تاريخيا متباينا لا مجال للخوض فى تفاصيله هنا . فمثلا ، نحن جميعا لا نزال نسمع حتى يومنا هذا عن الياردة والذراع كوحدات طول ، كذلك الرطل والحجر – stone كوحدات كتلة . المهم ، أن الاتفاق على نظام للوحدات وصل إلى ما يسمى بنظام «متر . كيلو جرام . ثانية . كولوم – MKSC » الوحدة فيه هى المتر للطول والكيلو جرام للكتلة والثانية للزمن والكولوم للشحنة

الكهربية. في عام ١٩٦٠م تم تعديل بسيط على هذا النظام يتعرض أساساً لتعريف وحدة القوة ، وهي وحدة غير أساسية ، أي مستنتجة . ففي نظام "MKSC" كانت تعرف وحدة القوة بأنها «وزن كيلو جرام» ، أي القوة التي تعطى جسم كتلته واحد كيلو جرام عجلة مساوية للجاذبية الأرضية . بعد التعديل ، تم الاتفاق على تعريف وحدة القوة بأنها القوة التي تعطى جسم كتلته واحد كيلو جرام عجلة مقدارها متر / ثانية . ثانية ، وسميت هذه الوحدة «نيوتن» . أطلق على النظام المعدل «النظام الدولي للوحدات International System of Units (SI) » أخذت به كل من «الهيئة القياسية الدولية – International Standards Organization (ISO) «والمفوضية الدولية الكهروتكنولوجية International Electrotechnical Commission (IEC) » . يوضح الجدول رقم (٢-١) المقادير الطبيعية ورموزها ، والوحدات الأساسية ورموزها ، المستعملة في هندسة الكهرباء والإلكترونيات .

جدول (٢-١) رموز ووحدات المقادير الطبيعية

المقدار الطبيعي	رمز المقدار الطبيعي	الوحدة	رمز الوحدة
الطول Length	L	متر Meter	M
الكتلة Mass	M	كيلو جرام Kilogram	K
الزمن Time	T	ثانية Second	S
الشحنة Charge	Q	كولوم Coulomb	C

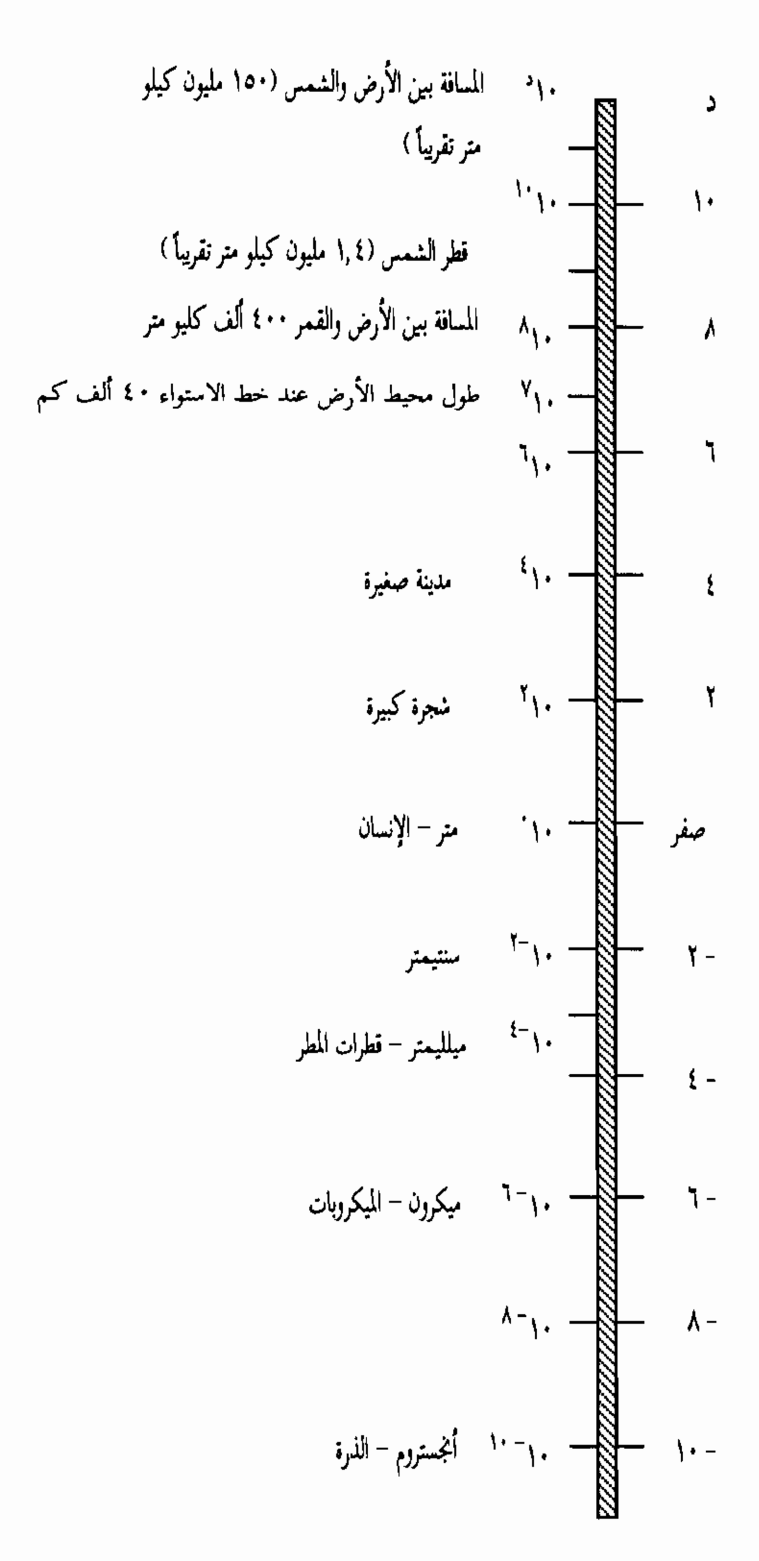
٣/٢ تدرج مقاييس الوحدات

في بعض التطبيقات ، قد تكون قيمة الوحدة كبيرة جداً بالنسبة للمقادير المتداولة، وفي تطبيقات أخرى قد تكون العكس . لهذا السبب يستعمل تدرج قياسي للوحدات ، مشابهاً للمقياس اللوغاريتمي ، كمضروب ١٠^د حيث « د» ، وهي درجة المضروب العشرى (Decade) ، رقم صحيح موجب أو سالب . وذلك للحصول على أرقام سهلة الإستيعاب لقيم المقادير . ولكل درجة مسمى كما هو مبين في الجدول رقم (٢-٢) . في حالة الزمن بصفة خاصة فإن درجة المضروب العشرى «د» تأخذ فقط قيماً سالبة لتمثل القيم الأقل من الثانية . أما القيم التي هي أكبر من الثانية ، فقد جرى العرف على استعمال الدقيقة والساعة واليوم والأسبوع والشهر والسنة،كما هو معرووف .

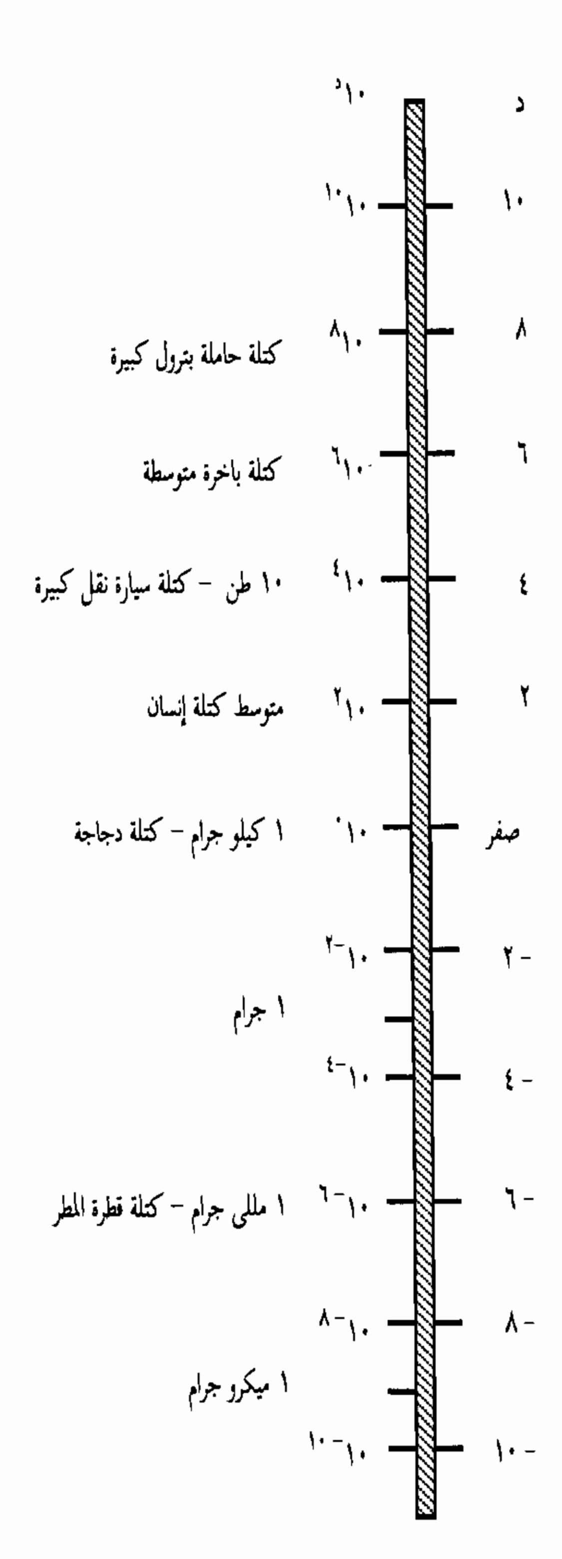
جدول (٢-٢) التدرج القياسي للوحدات

درجة المضروب العشري «د»	١±	٢±	٣±	٦±	٩±	١٢±	١٥±	١٨±
المسمى للموجب	ديكا Dece da	هيكتو Hecto h	كيلو Kilo k	ميجا Mega M	جيجا Giga G	تيرا Tera T	بيتا Peta P	إكزا Exa E
المسمى للسالب	ديسى Deci d	سنتى Centi c	مللى Mili m	ميكرو Micro μ	نانو Nano n	بيكو Pico p	فيمتو Femto f	أوتو Atto a

يبين الشكل رقم (٢-١) تدرج مقياس وحدة الطول « المتر » ، وأمثلة من الطبيعة لما تمثله بعض القيم . كذلك يبين الشكل رقم (٢-٢) تدرج مقياس وحدة الكتلة «كيلو جرام» ، وأمثلة من الطبيعة لما تمثله بعض القيم .



شكل (٢-١) : تدرج مقياس وحدة الطول وأمثلة لبعض القيم .



شكل (٢-٢) : تدرج مقياس وحدة الكتلة وأمثلة لبعض القيم .

٤/٢ الطاقة - Energy

الطاقة مقدار طبيعى مهم جدا فى جميع أفرع العلم ، بما فى ذلك علم الإلكترونيات . تتمثل الطاقة فى عمل شغل أو القدرة على عمل شغل . لذلك ، فإن وحدة الطاقة هى نفسها وحدة الشغل ، وهى وحدة غير أساسية ، أى أنها مستنتجة من قانون ارتباط الطاقة أو الشغل بالمقادير ذات الوحدات الأساسية . تسمى وحدة الطاقة « جول – Joule » ، ويرمز لها بالرمز "J" . وأبسط قانون للطاقة أو الشغل هو :

الطاقة / الشغل = القوة × المسافة

= الكتلة × العجلة × المسافة

= كيلو جرام × (متر / ثانية . ثانية) × متر

من هذا يمكن تعريف الجول بأنه كمية الطاقة اللازمة لدفع جسم كتلته واحد كيلو جرام بعجلة مقدارها ١ متر / ثانية . ثانية لمسافة متر واحد . من المناسب هنا ، كما سيتضح فيما بعد ، التنويه أنه فى دراسة الإلكترونيات نستعمل كثيرا وحدة خاصة للطاقة تسمى «إلكترون فولت – eV » ، وتعريفها أنها الطاقة التى يكتسبها الإلكترون نتيجة انتقاله بالجذب أو سقوطه بين نقطتين الفرق فى الجهد بينهما واحد فولت ، وقيمة هذه الوحدة ١,٦ × ١٠^{-١٩} جول .

الطاقة نوعان ، طاقة حركة نتيجة حركة الجسم بسرعة معينة فى أى مسار استقامى أو منحنى ، وطاقة وضع نتيجة تواجد الجسم فى مجال قوة فى وضع مقاوم لتأثير قوة هذا المجال عليه . هذه الطاقة تسمى طاقة ميكانيكية إذا كانت نتيجة تفاعل كتلة الجسم ومجال الجاذبية ، وتسمى طاقة كهربية إذا كانت نتيجة تفاعل شحنة الجسم ومجال كهرومغناطيسى . هناك صور أخرى عديدة للطاقة من بينها ، الطاقة الكيميائية ، الطاقة الحرارية ، الطاقة الهيدرولكية ، الطاقة الشمسية ، وغيرها . كل هذه الأنواع من الطاقة قابلة للتحول فيما بينها بآلات وأجهزة خاصة ، وهذا مجال العديد من التطبيقات فى تخصصات مختلفة خارج حدود اهتماماتنا هنا .

نعود الآن للطاقة الكهربية التى ، كما ذكرنا ، تتواجد نتيجة تفاعل جسم مشحون مع مجال كهرومغناطيسى . أوضح مثال على ذلك ، وما يهمنا أيضا ، هو تواجد الإلكترون فى المجال الكهربى لنواة الذرة . هذا ما درسه العالم الهولاندى نيلز بور – Niels Bohr ، وبنى عليه آخرون فى دراسة التركيب الداخلى للذرة ، والتطورات التى سنتعرض لها فى الباب القادم إن شاء الله .

من أهم مميزات استعمال الطاقة فى الدراسات والتحليلات العلمية أنها مقدار أحادى البعد – Scalar ، أى أن قيمتها تحدد برقم واحد فقط مثلها فى ذلك مثل

مقادير طبيعية أخرى كالكتلة والكثافة ودرجة الحرارة وغيرها . هذا بعكس المقادير المتعددة البعد – Vectors التى تحدد قيمها برقمين أو أكثر مثل القوة والسرعة والعجلة وغيرها . من المهم ملاحظة أن قيمة الطاقة غير مطلقة ، ولكنها نسبية مثلها فى ذلك مثل مناسيب الارتفاعات فى دراسة المساحة مثلاً . ففى كلتا الحالتين لنا مطلق الحرية فى اختيار منسوب معين على أنه نقطة الصفر ، ونتحرك حوله بالزيادة حيث تكون النقط موجبة أو بالنقصان حيث تكون النقط سالبة .

بقيت نقطة أخيرة مهمة . ذلك أنه فى التفاعل بين كتلة الجسم ومجال الجاذبية، توجد فقط أجسام ذات كتل موجبة ، حيث لا يوجد جسم له كتلة سالبة . بذلك يوجد نوع واحد من مناسيب الطاقة . فإذا ترك الجسم حرا فى هذا المجال فإنه يسقط ذاتيا من مستويات ذات طاقة عالية إلى مستويات ذات طاقة منخفضة ، أى أنه يسقط إلى أسفل ، ويحتاج إلى قوة خارجية كى يفعل العكس . أما فى حالة التفاعل بين شحنة الجسم والمجال الكهربى ، فمن الممكن أن تكون شحنة الجسم موجبة أو سالبة ، وكل منهما يتفاعل مع المجال نفسه بصورة عكسية للآخر . فإذا رتبت مستويات الطاقة على أساس الجسم ذى الشحنة الموجبة ، فإن الجسم الموجب الشحنة يسقط ذاتيا من مستويات الطاقة العالية إلى مستويات الطاقة المنخفضة ، أى أنه يسقط إلى أسفل . بينما يطفو الجسم ذو الشحنة السالبة ذاتيا من مستويات الطاقة المنخفضة إلى مستويات الطاقة العالية. ويحدث العكس إذا رتبت مستويات الطاقة على أساس الجسم ذى الشحنة السالبة . هذا المفهوم مهم جدا لتصور وتخيل تحركات حوامل الشحنات الكهربية الموجبة والسالبة داخل الجوامد كما سنرى فيما بعد .

٥/٢ الإشعاع - Radiation

الإشعاع عبارة عن تموجات كهرومغناطيسية ذات ترددات مختلفة تسير بسرعة الضوء . مصدر الإشعاع هو المادة ، وكلاهما نوع من الطاقة . وكل ما يحدث حولنا فى الطبيعة يرجع إلى التفاعل بين المادة والإشعاع . أى مادة عند درجة حرارة فوق الصفر المطلق تبث إشعاعا بطريقة أو أخرى ، ويزداد إشعاعها كلما ازدادت درجة حرارتها . عندما يسقط الإشعاع على المادة يحدث تفاعل ما بينهما بطريقة تعتمد على نوع المادة وتردد أو طول موجة الإشعاع ، من حيث أنه قد يحدث للإشعاع انعكاس كلى أو جزئى أو امتصاص أو إمرار بنسب متفاوتة .

أول ما عرفه الإنسان من التموجات الكهرومغناطيسية ، وفى الوقت نفسه أوضح مثال لها ، هو الضوء المرئى الذى يغطى حيزاً ضيقاً من الطيف الكهرومغناطيسى على مدى الطول الموجى من ٤٠٠٠ إلى ٨٠٠٠ أنجستروم . وهذه الحقيقة التاريخية منطقية حيث إن عين الإنسان هى أفضل جهاز استقبال حساس لهذا المدى .

أكبر مصدر للإشعاع هو النجوم بما فيها الشمس . مصادر الإشعاع الأخرى عديدة من بينها ، التفاعلات الكيميائية بين المواد ، التفريغ الكهربى فى الغازات ، تسخين المواد ، وغير ذلك . أى مصدر من هذه المصادر يمكن أن يعطى إشعاعا عند ترددات متقطعة معينة حسب المادة المشعة كما هو الحال عند التفريغ الكهربى فى غازات عند ضغوط منخفضة .

يوضح الشكل رقم (٢-٣) الطيف الكهرومغناطيسى ابتداء من الترددات المنخفضة مرورا بتموجات الراديو ، تحت الحمراء ، الضوء المرئى ، فوق البنفسجية ، أشعة إكس ، أشعة جاما ، إلى الأشعة الكونية . بما أن الطيف الكهرومغناطيسى يغطى مدى غير محدود من الترددات ، فإن المقياس اللوغاريتمى يستعمل عادة فى البعد الترددى . يقع الصفر على هذا المقياس عند ناقص مالا نهاية ($-\infty$) ، أى أننا لا نراه، ويشغل كل عقد (مضروب عشرة – Decade) الطول نفسه . على هذا المقياس نستطيع أن نبدأ التدريج بأى تردد منخفض يهمنا ، ونستعمل أى عدد من العقد حسب الإحتياج كما هو موضح بالشكل . التردد ، ويرمز له بالرمز "f" مرتبط بطول الموجة "λ" بالعلاقة $\lambda = c/f$ حيث "c" هى سرعة الضوء وقيمتها فى الفراغ تساوى ٣×١٠^{٨} متر / ثانية . فى العادة يستعمل التردد "f" عند الترددات المنخفضة ، وعندما يزداد التردد لقيم عالية جدا يصعب استيعابها يفضل استعمال طول الموجة "λ".

الحزمة المرئية ←

سمعى – راديو – ميكروية – تحت الحمراء – فوق بنفسجية – أشعة أكس – أشعة ألفا

التردد (هرتز) f(Hz): 10^{2} ، 10^{4} ، 10^{6} ، 10^{8} ، 10^{10} ، 10^{12} ، 10^{14} ، 10^{16} ، 10^{18} ، 10^{20} ، 10^{22}

λ طول الموجة (متر): 3×10^{6} ، 3×10^{4} ، ٣٠٠ ، ٣ ، 3×10^{-2} ، 3×10^{-4} ، 3×10^{-6} ، 3×10^{-8} ، 3×10^{-10} ، 3×10^{-12} ، 3×10^{-14}

(٣ سم) (٣ ميكرون) (٣ أنجستروم)

الطاقة (إلكترون فولت – eV): 10^{-14} ق ، 10^{-12} ق ، 10^{-10} ق ، 10^{-8} ق ، 10^{-6} ق ، 10^{-4} ق ، 10^{-2} ق ، ق ، 10^{2} ق ، 10^{4} ق ، 10^{6} ق

ق = ٤١,٣٣ إلكترون فولت

شكل (٢-٣) : الطيف الكهرومغناطيسى .

التموجات الكهرومغناطيسية لها الصفات الطبيعية نفسها من حيث أنها تتكون من مجـــالين كهربى ومغناطيسى متعامدين ومتغيرين مع الزمن ويتحركان سويا بسرعة الضوء . رغم هذا التشابه ، فإن مجرد سرعة التغير مع الزمن ، المعروف بالتردد ، هو السبب فـــى الاختلاف الشديد بينها من حيث المنشأ والمسار والإحساس ، والخواص عامة . منشأ الإشعاع يرجع أساساً إلى التصرفات الديناميكية للجسيمات المكونة للذرة ، أو لنفس ذرات وجزيئات المادة . ويمكن إرجاع منشأ مدى الترددات المختلفة إلى المصادر الآتية :

أ – تموجات الراديو تنشأ نتيجة تردد الإلكترونات الحرة فى هياكل معدنية (المعروفة بالهوائيات) . تتولد هذه الترددات الإلكترونية على شكل تيار كهربى نابع من دائرة إلكترونية تولد الترددات المطلوبة بالطاقة المطلوبة .

ب– التموجات تحت الحمراء تنشأ نتيجة إهتزاز الذرات أو الجزيئات حول مكانها المفترض فى المادة نتيجة تسخينها وإرتفاع درجة حرارتها .

جـ – الضوء المرئى والأشعة فوق البنفسجية ينشآن نتيجة إنتقال الإلكترونات فى المـــدارات الخارجية للذرات من مستويات طاقـــة مـــرتفعة إلى مستويات طاقة منخفضة .

د – أشعة إكس تنشأ نتيجة إنتقال للإلكترونات مشابه لحالة الضوء المرئى ، إلا أن الإنتقال يحدث بين مستويات للطاقة عميقة داخل الذرة .

هـ – أشعة جاما تنشأ من المواد المشعة تلقائيا ، وعند تحطم نواة الذرات .

و– الأشعة الكونية تأتى من مكونات الكون فى الفضاء البعيد .

٦/٢ الجسم الأسود - Black Body

الجسم الأسود هو أى مصدر مادى يعطى إشعاعا كهرومغناطيسيا يعتمد توزيعه الترددى على درجة حرارة هذا المصدر . حتى نهاية القرن التاسع عشر كان التوزيع الترددى لإشعاع الجسم الأسود معروف معمليا فقط . ولم يستطع أحد بالقوانين القائمة حينذاك إثباته نظريا رغم عديد من المحاولات الجادة بواسطة علماء قادرين . فى عام ١٩٠١م تمكن العالم الألمانى ماكس بلانك – Max Planck (١٨٥٨ – ١٩٣٨) من الحصول على الإثبات النظرى المطلوب . توصل بلانك لهذا الإثبات النظرى بتقديم افتراض مثير ، أثار جدلا ودهشة بين العلماء فى ذلك الوقت . ذلك أن بلانك فى محاولته لإثبات خواص إشعاع الجسم الأسود نظريا ، افترض أن الإشعاع ليس مستمراً سواء فى المصدر أو فى المسار ، ولكنه يتكون من وحدات أو كوانتا –

quanta أطلق عليها اسم فوتونات – Photons . مواصفات هذه الفوتونات أنها جسيمات لا كتلة لها ولا شحنة عليها تسير بسرعة الضوء وتحمل كل منها كمية من الطاقة تتناسب مع التردد أى تساوى "hf" حيث "h" مقدار ثابت أطلق عليه ثابت بلانك – Planck's Constant . أى أن الإشعاع له وجهان للتعامل ، الوجه التموجى المعروف ، ووجه جسيمى كأنه قذائف من فوتونات تسير بسرعة الضوء لكل منها طاقة تساوى حاصل ضرب ثابت بلانك "h" فى التردد "f" . من هنا تتضح خطورة التعرض لهذه الإشعاعات كلما ازداد التردد .

فتح بلانك بذلك الباب لنظريات جديدة هامة هى النظرية الكمية – Quantum Theory وميكانيكا الكم – Quantum Mechanics التى تطورت سريعا إلى نتائج مذهلة على مدى الربع الأول من القرن العشرين . واضح أنه من المستحيل ، ولو من بعيد ، التعرض هنا لهذه النظريات ، ولكننا سنستعمل بعض نتائجها المقربة فيما بعد .

٣- مساكن الإلكترونات داخل الذرة وداخل المادة

١/٣ مقدمة

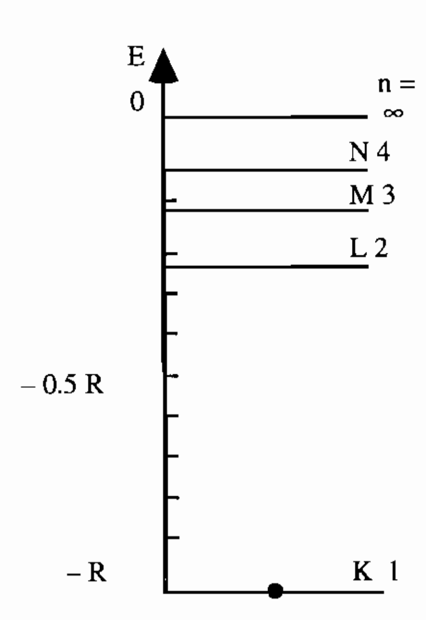
المقصود بمساكن الإلكترونات هى الأماكن المتاحة لتواجد هذه الإلكترونات داخل الذرة وداخل المادة ، وسعة هذه الأماكن . بالنسبة للذرة المنعزلة ، يمكن تعريف هذه الأماكن على أنها المدارات التى تدور فيها هذه الإلكترونات حول النواة فى الفراغ الذرى . أو يمكن تعريفها على أنها مستويات الطاقة لهذه المدارات محسوبة على أساس الشحنة السالبة . تعريف المساكن أو الأماكن على أنها مستويات الطاقة هو الأنسب والمستعمل عادة فى دراسة الإلكترونيات . بالنسبة للمواد ، حيث تتقارب الذرات وتؤثر فى بعضها البعض ، تتحول بعض مستويات الطاقة ، وخاصة العالية منها ، إلى حزم للطاقة . سنرى فيما بعد أن لهذه الحزم السكنية وواقع إشغالها بالإلكترونات تأثيراً كبيراً على الخواص الكهربية لتلك المواد . هذا من ناحية تواجد الأماكن . أما من ناحية الإشغال الفعلى لهذه الأماكن بالإلكترونات ، فيتحكم فى ذلك ثلاثة عوامل . العامل الأول ، وهو أوضح فى حالة الذرة ، هو عدد الإلكترونات فى كل ذرة . فمثلا فى حالة ذرة الهيدروجين يوجد عدد لا نهائى من الأماكن المتاحة ، ولكن ذرة الهيدروچين بها إلكترون واحد فقط لا غير يلزمه مكان واحد فقط لا غير . العامل الثانى هو درجة الحرارة . العامل الثالث ، وينطبق على المواد أساسا ، هو التعادل الإحصائى الذى يؤدى إلى نظرية فيرمى – Fermi لاحتمال إشغال الأماكن بالإلكترونات . فكى تشغل الإلكترونات فى المواد مستويات معينة للطاقة ، يلزم تواجد مساكن خالية فى هذه المستويات ، كما يلزم فى الوقت نفسه سماح نظرية فيرمى لهذا الإشغال . عند درجة حرارة الصفر المطلق ، يبدأ إشغال الإلكترونات المتواجدة للمساكن المتاحة من أسفل إلى أعلى حتى يكتمل إسكانها جميعا . لا يرتفع أى إلكترون من مكانه إلى مستوى أعلى خالٍ إلا إذا اكتسب طاقة خارجية كافية لذلك إما بالتسخين أو التعرض لإشعاع أو غير ذلك .

٢/٣ مساكن الإلكترونات داخل الذرة

كانت أول خطوة مؤثرة فى اتجاه تحديد مساكن الإلكترونات داخل الذرة هى ما قام به نيلز بور – Niels Bohr عام ١٩١٣م بالنسبة لذرة الهيدروچين . كان نيلز بور مستنيرا ومستعينا فى خطواته بما سبق أن افترضه رذرفورد – Rutherford عام ١٩١١م بالنسبة للتركيب الداخلى للذرات من أنها تتكون من نواة موجبة تدور حولها الإلكترونات فى مدارات محددة ، وكذلك مستنيرا بالافتراض الكمى لبلانك – Planck عام ١٩٠١م بالنسبة للإشعاع كما سبق ذكره . قدم بور اقتراحاً كمياً للحركية الدائرية للإلكترونات حول النواة على النحو التالى :

الحركة الدائرية للإلكترون = $n (h/2) = mvr$

حيث "n" رقم كمى يأخذ قيماً صحيحة من واحد إلى مالا نهاية . استنتج بور بذلك أن مساكن الإلكترونات فى ذرة الهيدروچين عبارة عن عدد لا نهائى من المدارات الدائرية نصف قطر كل منها "rn" حيث "r" هو نصف قطر أصغر وأول مدار داخلى مقابل (n=1) قيمته ٠,٥٣ أنجستروم . ولكل مدار مستوى محدد للطاقة قيمته "-R/n" حيث "R" تسمى وحدة رايدبرج - Rydberg للطاقة قيمتها ١٣,٦ إلكترون فولت (eV) . من ذلك ، فإن مستوى الطاقة الأول لأصغر مدار فى ذرة الهيدروچين ، مقابل "n=1" ، هو "-R" ، ثم يزداد (يقل سالبية) كلما زادت "n" حتى يصل إلى الصفر عند "n = ∞" . مستوى الطاقة صفر هذا ، هو الحد الفاصل بين داخل الذرة وخارجها . يمثل الشكل رقم (٣-١) مستويات الطاقة لذرة الهيدروچين لبعض قيم الرقم الكمى "n" كما حصل عليها بور . نستنتج من هذا الشكل الملاحظات المهمة الآتية :



شكل (٣-١) : مستويات الطاقة لذرة الهيدروچين .

أ - القوانين الكلاسيكية ، مثل قوانين نيوتن ، لا تنطبق على الأجسام داخل الذرة . بل يلزم قوانين جديدة ، هى القوانين الكمية .

ب- تنحصر مساكن الإلكترونات داخل الذرة عند مستويات محددة للطاقة . وفيما عدا ذلك غير مسموح بأى تواجد للإلكترونات .

جـ- مستويات الطاقـة ، المسموح تواجـد الإلكترونات بها ، تتقـارب عند القيم المرتفعة ، وتؤول في النهاية إلى ما نعرفه كلاسيكيا باستمرارية السماح بتواجد الإلكترون عند أي قيمة للطاقة خارج الذرة .

د - بما أن ذرة الهيدروچين بها إلكترون واحد ، فإنه في درجة حرارة الصفر المطلق يتواجد هذا الإلكترون عند أقل مستوى مسموح للطاقة ، وهو المقابل للرقم الكمي "n=1" .

إذا تعرضت ذرة الهيدروچين لطاقة خارجية سواء بالتسخين أو بالإشعاع أو بأي صورة أخرى ، فإن هذه الطاقة الخارجية يلزم أن تساوي أو تزيد عن الفرق بين المستويين الأول والثاني كي ينتقل الإلكترون من المستوى الأول إلى المستوى الثاني ، وإلا بقي الإلكترون كما هو في المستوى الأول ، وفي هذه الحالة تستهلك الطاقة الخارجية بأكملها في تسخين الذرة . إذا زادت الطاقة الخارجية عن الفرق بين المستويين الأول والثاني ولكنها ما زالت أقل من الفرق إلى المستوى الثالث ، فإن الإلكترون ينتقل إلى المستوى الثاني مكتسبا الفرق بين المستويين الأول والثاني ، والباقي من الطاقة الخارجية يستهلك في تسخين الذرة . عند سقوط الإلكترون من المستوى الثاني إلى المستوى الأول ، فإنه يعطي إشعاعا أو فوتون يتحدد تردده بالقانون "E2–El = hf" . إذا تساوت الطاقة الخارجية أو زادت عن "R" ، فإن الإلكترون يترك الذرة كلية ، وتتحول الذرة إلى أيون موجب . لذلك تسمى قيمة الطاقة "R" بطاقة التأين لذرة الهيدروچين .

بهذه المفاهيم ، استطاع بور تقديم الإثبات النظري لنتائج التجارب المعملية المعروفة للتحليل الطيفي لإشعاع ذرات الهيدروچين . هكذا نجحت نظرية بور بالنسبة لذرة الهيدروچين . لكنها لم تنجح عند تطبيقها على الذرات الأثقل ، وكان لابد من البحث عن الأسباب . بالمزيد من البحث والتجارب والمشاهدة ، توصل العلماء إلى تعديلات مهمة على نظرية بور . من أهم هذه التعديلات مايلي :

أ - أول تعديل ، قدمه أرنولد سومرفيلد - Arnold Sommerfeld (١٨٦٨ - ١٩٥١) عام ١٩١٦م ، هو أن المدارات التي تدور فيها الإلكترونات حول النواة ليست جميعها بالضرورة دائرية كما افترض بور ، بل من الممكن أن تكون أيضا على شكل قطع ناقص "elliptical" . وأضاف رقماً كمياً جديداً "l" يأخذ قيماً صحيحة من صفر إلى (n-1) ، حيث "$(l+1)/n$" تساوي نسبة المحور الأصغر إلى المحور الأكبر للقطع الناقص . وأعطيت رموز للرقم الكمي "l" كمايلي :

صفر (s) ، ١ (p) ، ٢ (d) ، ٣ (f) ، .... .

ب- لوحظ ، فيما يعرف بتأثير زيمان – Zeeman effect ، أن تعرض الذرات لمجال مغناطيسي خارجي يتسبب في انشقاق معظم مستويات الطاقة إلى أكثر من مستوى . أدى هذا إلى تحديد كمي لاتجاهات مستويات مدارات الإلكترونات في الفضاء لكل قيمة "l" ، وذلك بتقديم رقم كمي فضائي "m" يأخذ قيماً صحيح من صفر إلى "$\pm l$" أي أن كل رقم كمي "l" يمثل عدداً من المساكن يساوي $(2l+1)$.

جـ- وجد كذلك أن كل إلكترون ، بالإضافة إلى دورانه حول النواة ، يدور أيضا حول نفسه (spin) إما يمينا أو يسارا . وكل مسكن معروف عنوانه بالأرقام الكمية الثلاثة "n,l,m" يقبل إلكترونين اثنين على الأكثر للإقامة به ، أحدهما يدور حول نفسه يمينا والآخر يدور حول نفسه يسارا .

دون الدخول في تفاصيل أكثر والخوض في المياه العميقة ، يكفينا هنا ، وبناء على ما تقدم ، تلخيص الوضع بالنسبة لمساكن الإلكترونات في الذرات كما يلي :

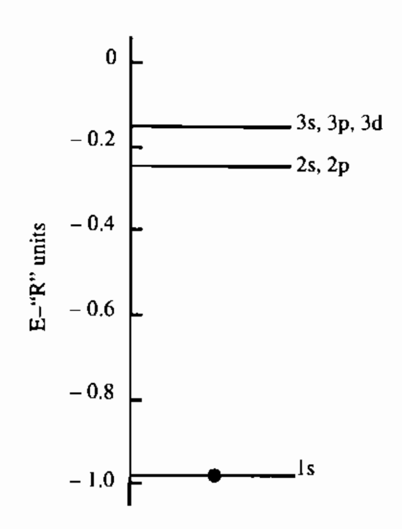
أ – رغم التعديلات السابق ذكرها ، فإن مساكن الإلكترونات في أي ذرة مازالت مركزة في مستويات حادة ومحددة للطاقة . وتواجد الإلكترونات فيما بين هذه المستويات ممنوع .

ب- كل مستوى مسموح للطاقة له عنوان أو مسمى يعرف بالرقمين الكمين "l,n" ولكل عنوان سعة قدرها $(2l + 1)$ مسكن ، يسع كل مسكن عدد اثنين إلكترون لكل منهما دوران ذاتي (spin) مضاد للآخر . بذلك لدينا العناوين الآتية ، حيث لكل عنوان سعة قصوى للإلكترونات ممثلة بالرقم بين القوسين :

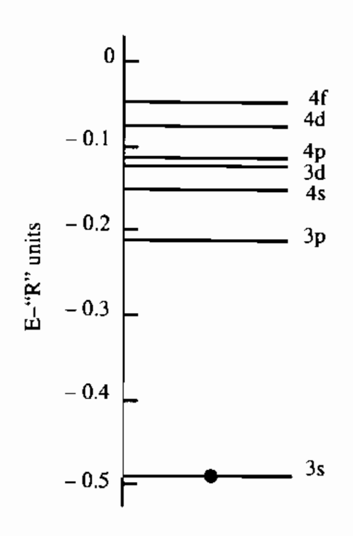
1s (2)   2s (2) 2p (6)   3s (2) 3p (6) 3d (10)

4s (2) 4p (6) 4d (10) 4f (14) ....

جـ- قد ينطبق أكثر من عنوان على المستوى نفسه للطاقة كما هو الحال في حالة ذرة الهيدروچين (الرقم الذرى Z=1) الموضح بالشكل رقم (٣-٢) أ . وقد يدل كل عنوان على مستوى مختلف للطاقة كما هو الحال في حالة ذرة الصوديوم (الرقم الذرى Z=11) الموضح بالشكل رقم (٣-٢) ب .



أ- مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين Z = 1



ب- مستويات الطاقة لذرة الصوديوم Z = 11

شكل (٣-٢)

د - كل عنوان له سعة إلكترونية محددة لا يقبل أكثر منها . فى درجة حرارة الصفر المطلق ، تملأ مستويات الطاقة من أسفل إلى أعلى حتى يتم إسكان جميع الإلكترونات المتاحة ، وتبقى باقى المساكن خالية . عند ارتفاع درجة الحرارة يحدث ما سبق أن ذكرناه من انتقال بعض الإلكترونات إلى مساكن عالية خالية ، وفى عودتها تطلق إشعاعا .

هـ - المستوى صفر للطاقة يمثل الحد بين داخل الذرة وخارجها . الطاقات خارج الذرة موجبة ، ومسموح للإلكترونات بالتواجد عند أى قيمة منها كما هو معروف كلاسيكيا .

بقى أن نلاحظ أن الصفات السابقة تنطبق فقط على الذرات المنعزلة حيث تمثل كل ذرة نظاما مستقلا بعيدا عن التأثر بأى نظام آخر . من الناحية النظرية ، لا يوجد فى العالم نظام منعزل . فجميع النظم التى نعرفها متأثرة ببعضها البعض بدرجات متفاوتة ، والكون الذى لا نعرف مداه يشمل جميع الأنظمة المعروفة لنا والغير معروفة صغيرها وكبيرها . رغم هذا ، فمن الناحية العملية ، يمكن اعتبار الذرة نظاماً منعزلاً فى الغازات والأبخرة عند الضغوط المنخفضة . فكلما انخفض ضغط الغاز أو البخار تباعدت الذرات عن بعضها بحيث تقل التأثرات فيما بينها لدرجة يمكن إهمالها . هذا ما يلجأ إليه العلماء لدراسة خواص الذرات المنعزلة . فى الغازات والأبخرة ذات الضغوط المرتفعة وفى السوائل والجوامد تظهر التأثرات بين الذرات المتقاربة ، وهذا يؤثر على

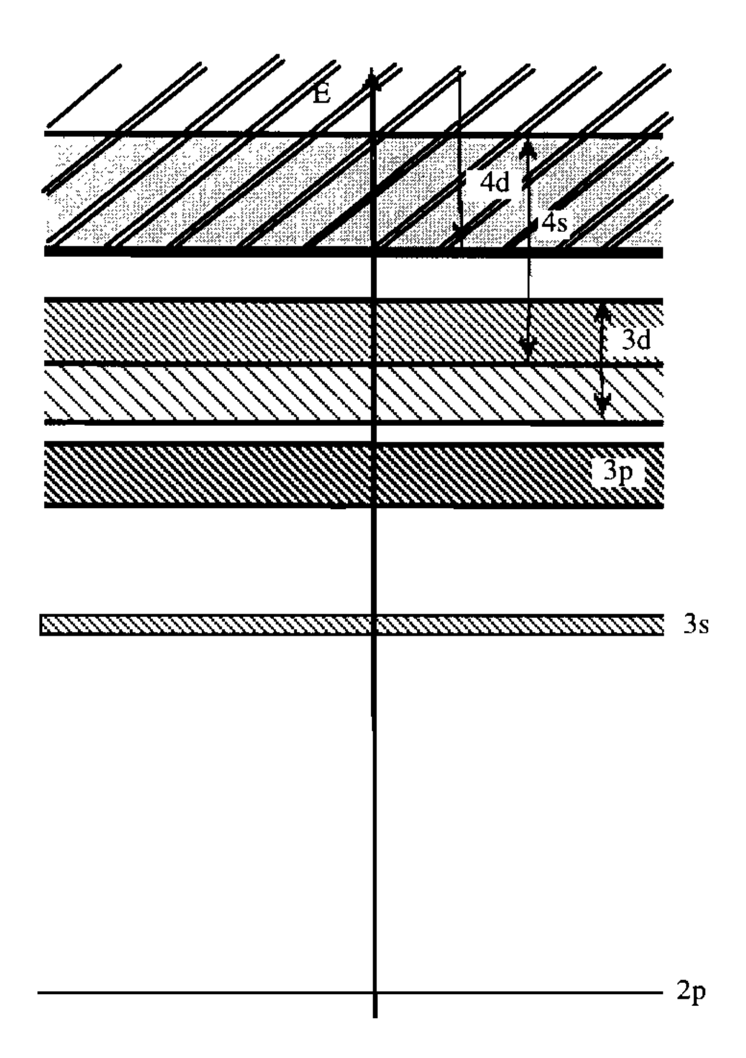
الخواص الذاتية للذرات . كما هو متوقع ، فإن التأثير يكون أشد بالنسبة للمدارات الخارجية للذرات ، ويقل للمدارات الأعمق حتى حد معين يختفي عنده التأثير تماما . أى أن هناك قلباً (core) للذرة مكون من النواة وبعض المدارات القريبة منها لا تشعر بالعالم الخارجي ، مهما تقاربت الذرات أو تعرضت للمؤثرات الخارجية المعتادة . اللهم إلا إذا حدث اختراق بقوى خارجية فائقة مثل ما يحدث فى الانشطار والاندماج النووى. وهذا موضوع كبير مستقل خارج نطاق اهتماماتنا هنا .

٣-٣ مساكن الإلكترونات داخل الجوامد

داخل المادة وخاصة الجوامد ، تتقارب الذرات من بعضها على مسافات مستقرة ومحددة حسب نوع المادة ، تقدر قيمها عادة ببضعة أنجسترومات (Angstroms) . فى دراسة الإلكترونيات ، نتعرض غالبا إلى الجوامد البللورية التى تنتظم فيها الذرات فى خلايا هيكلية تتكرر بانتظام على مدى حجم المادة فيما يعرف بالتركيب البللورى . رغم أن الجوامد المتعددة التبلور (Polycrystalline) والجوامد ذات التركيب العشوائى (Amorphous) تستعمل أحيانا فى التطبيقات الإلكترونية ، إلا أننا سنركز هنا على الجوامد البللورية التى هى أكثر استعمالا وأسهل نمذجة وتحليلا .

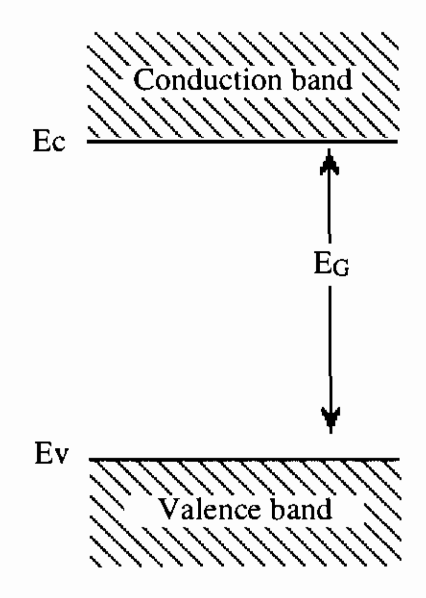
فى هذه البللورات ، ونتيجة التفاعل المتبادل بين الإلكترونات فى المدارات الخارجية للذرات ، يحدث اتساع فى مستويات الطاقة لهذه المدارات . فإذا تخيلنا أن الذرات تبدأ بخواصها الذاتية وهى متباعدة ، ثم بدأت تتقارب لتستقر فى النهاية عند بعدها الطبيعى للمادة "r" ، فإن اتساع مستويات الطاقة ، كما هو متوقع ، يبدأ مبكرا فى مستوى طاقة المدار الخارجى ، ثم يبدأ الاتساع فى مستوى طاقة المدار الذى يليه داخليا ، وهكذا . كذلك ، فإنه من المعروف أن هناك بعداً محدداً بين الذرات ، يعتمد على نوع المادة ، يمثل الاستقرار الطبيعى للبللورات . عند بعد الاستقرار هذا (r) ، يكون وضع مستويات وحزم الطاقة للمادة البللورية كما هو موضح بالشكل رقم (٣-٣) . من هذا الشكل نرى أن مستويات طاقة المدارات العميقة فى الذرة لم تتأثر ، وتحتفظ بخواصها فى الذرة المنعزلة كمستويات حادة ومحددة . بينما تتحول مستويات طاقة المدارات المرتفعة إلى حزم من الطاقة المسموحة يفصل بينها فجوات من الطاقة الممنوعة . يزداد عرض حزم الطاقة المسموحة ويقل عرض فجوات الطاقة الممنوعة كلما ارتفعنا بالطاقة . يلاحظ أنه عند حد معين تندمج حزم الطاقات المرتفعة المسموحة فى حزمة واحدة متصلة إلى خارج الذرة حيث كل قيم الطاقة مسموحة . فى المواد البللورية ، تحتسب مساكن الإلكترونات وإشغال هذه المساكن عادة بالنسبة لوحدة الحجم وهو متر مكعب . متوسط عدد الذرات فى المتر المكعب يقع فى حدود $١٠^{٢٨}$ ذرة . من هذا يمكن ، إذا أردنا ، حساب السعات والإشغالات لمستويات الطاقة سواء

بقيت هذه المستويات حادة ومحددة كما هو الحال فى قلب الذرة (core) ، أو تحولت إلى حزم كما ذكرنا .



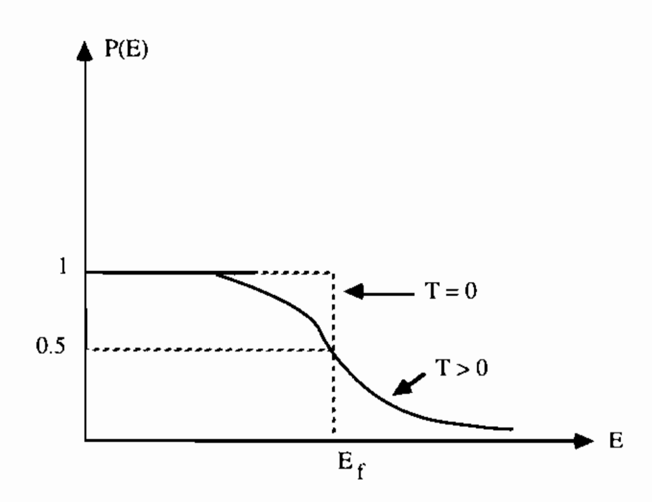
شكل (٣-٣) : مستويات وحزم الطاقة للمواد البللورية .

فى الدراسات الإلكترونية ، يكفينا التركيز على حزمة الطاقة المندمجة العليا وتسمى حزمة التوصيل "Conduction Band" حدها الأدنى "E_C" ، والحزمة المسموحة التى تليها إلى أسفل وتسمى حزمة التكافؤ "Valence Band" حدها الأعلى "E_V" ومسافة الطاقة الممنوعة بينهما تسمى الفجوة الممنوعة "Forbidden Gap" عرضها E_G حيث < "$E_G = (E_c - E_V)$" . هذا النموذج يسمى فى الإلكترونيات بالنموذج الحزمى للطاقة "Energy Band Model" كما هو موضح فى الشكل رقم (٣-٤) .



شكل (٣-٤) : النموذج الحزمى للطاقة للمواد البللورية .

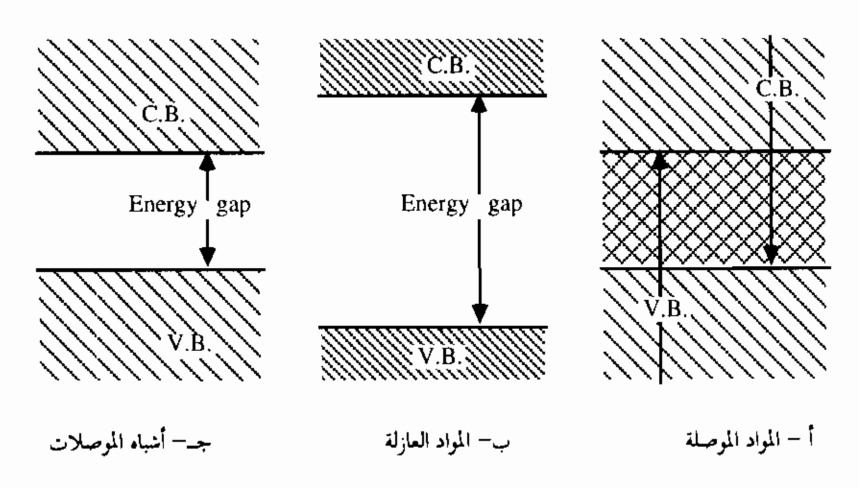
هذا من ناحية المساكن ، أما من ناحية التعادل الإحصائى ، فإن نظرية فيرمى للاحتمالات تحدد احتمال تواجد الإلكترونات عند الطاقات المختلفة . عند درجة حرارة الصفر المطلق ، تسمح نظرية فيرمى للإلكترونات بإشغال المساكن المتاحة بالكامل حتى مستوى معين للطاقة يسمى مستوى فيرمى (Fermi level "E_f") . بعد هذا المستوى للطاقة ينعدم احتمال التواجد الإلكترونى ، وبالتالى غير مسموح مهما توافرت المساكن. عند إزدياد درجة الحرارة ، يكون احتمال تواجد الإلكترونات عند مستوى فيرمى "E_f" ٥٠٪ ، ويصبح هناك احتمال لتواجد الإلكترونات عند طاقات أعلى من "E_f" مقابل تقليل مساو لاحتمال التواجدعند طاقات أقل من "E_f" كما هو موضح بالشكل رقم (٣-٥) . بذلك يمكن تعريف مستوى فيرمى للطاقة "E_f" أنه أعلى مستوى للطاقة يمكن تواجد إلكترونات عنده عند درجة حرارة الصفر المطلق .



شكل (٣-٥) : احتمال فيرمى لتواجد الإلكترونات عند الطاقات المختلفة .

بالرجوع إلى النموذج الحزمى للطاقة فى المواد البللورية ، وبالذات فى منطقتى حزمة التوصيل وحزمة التكافؤ الموضحة فى شكل (٣-٤) ، نرى أن هناك ثلاث إحتمالات لا أكثر لإشغال المساكن المتاحة بالإلكترونات على الوجه التالى :

أ- مساكن حزمة التكافؤ مشغولة بالكامل بالإلكترونات . ومساكن حزمة التوصيل مشغولة جزئيا إبتداء من حدها الأسفل "E_c" إلى حد معين حسب عدد الإلكترونات المتوفرة ، أو حصل تداخل بين حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل ، شكل (٣-٦) أ. الإلكترونات فى حزمة التوصيل تسمى إلكترونات حرة ، لأنها سهلة الحركة داخل المادة نظرا لوجود مساكن عديدة خالية قريبة ومتصلة . والمواد التى لها هذه الخواص تسمى موصلات كهربية حيث إنها عالية التوصيل للتيار الكهربى . أوضح مثال لذلك المعادن وخاصة الذهب والفضة والنحاس والألمونيوم . واضح أن مستوى فيرمى لهذه المواد يقع فى حزمة التوصيل فوق "Ec" .



شكل (٣-٦) إشغال المساكن بالإلكترونات

ب- مساكن حزمة التكافؤ مشغولة بالكامل بالإلكترونات . ومساكن حزمة التوصيل مفرغة تماما من الإلكترونات وعرض فجوة الطاقة الممنوعة "E_G" كبير ، شكل (٣-٦)ب ، فى هذه الحالة تكون الطاقة الخارجية المطلوبة لنقل إلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل عالية لدرجة أنها إما غير متوفرة أو تتسبب فى تغيير المادة كيميائيا . لذلك ، فإن مثل هذا الانتقال غير وارد ، ولا توجد حوامل شحنات حرة فى أى من حزمة التوصيل أو حزمة التكافؤ . هذه هى صفات المواد العازلة للكهرباء ، ومن أشهرها إستعمالا فى الإلكترونيات هو أكسيد السيليكون "SiO" حيث E_G = ٩ إلكترون فولت . يقع مستوى فيرمى "E_C" لهذه المواد فى منتصف فجوة الطاقة الممنوعة "E_G" .

جـ- كالحالة ب السابقة ، غير أن عرض فجوة الطاقة الممنوعة "E_G" صغير فى حدود واحد إلكترون فولت ، شكل (٣-٦)ج . عند درجة حرارة الصفر المطلق لا توجد فرصة لتحرك الإلكترونات ، حيث لا توجد إلكترونات حرة . تعتبر المادة فى هذه الحالة غير موصلة أو عازلة للكهرباء . ولكن ، نظرا لأن "E_G" صغيرة : هنا تكفى طاقة خارجية بسيطة ، مثل تواجد المادة عند درجة حرارة الغرفة (٣٠٠ مئوية) ، لنقل بعض الإلكترونات من قمة حزمة التكافؤ إلى قاع حزمة التوصيل. الإلكترونات المنقولة إلى حزمة التوصيل تصبح إلكترونات حرة، والفجوات التى تركتها الإلكترونات عند قمة حزمة التكافؤ تأخذ خاصية جسيمات موجبة الشحنة يطلق عليها اسم الفجوات ، وهى حرة الحركة داخل حزمة التكافؤ. الإلكترونات السالبة الحرة والفجوات الموجبة الحرة يشتركان سويا لجعل المادة موصلة للتيار الكهربى ، ولكن بدرجة أقل من المواد الموصلة . لذلك يطلق عليها مواد شبه موصلة أو أشباه الموصلات . كما هو متوقع ، فإن معامل التوصيل لهذه المواد يزداد سريعا مع ازدياد درجة الحرارة نتيجة تزايد عدد الإلكترونات والفجوات الحرة . هذا بعكس المواد الموصلة حيث يقل معامل التوصيل مع ازدياد درجة الحرارة نتيجة تزايد تصادم الإلكترونات الحرة بهيكل بناء المادة . ولعل هذه الخاصية أسرع اختبار للكشف عما إذا كانت مادة ما موصلة أو شبه موصلة ، كذلك يمكن إثبات أن مستوى فيرمى "E_F" لهذه المواد يقع فى منتصف فجوة الطاقة "E_G" .

لكل من المواد السابقة استعمالات وفوائد فى مجال الإلكترونيات . فالمواد الموصلة تستعمل للتوصيل الكهربى بين النقاط المختلفة . والمواد العازلة تستعمل كحوامل وشرائح عازلة . أما أشباه الموصلات فلها استعمالات أعمق وأهم ، حيث منها تصنع النبائط الإلكترونية والدوائر الإلكترونية المتكاملة كما سنرى فيما بعد .

٤/٣ أشباه الموصلات

من أهم العناصر التى لها صفات أشباه الموصلات السيليكون – Silicon ، وهو عنصر يقع فى العمود الرابع من جدول مندليف رقمه الذرى Z = ١٤ ، وعرض فجوة الطاقة الممنوعة به $E_G = 1.1$ eV . ومن أهم المركبات التى لها صفات أشباه الموصلات زرنيخات الجاليوم – Gallium Arsenide "GaAs" ، وهو مركب من مادتى الزرنيخ فى العمود الخامس والجاليوم فى العمود الثالث من جدول مندليف ، وعرض فجوة الطاقة الممنوعة به E_G = ٤ و ١ إلكترون فولت . وهاتان المادتان هما الأكثر شيوعا واستعمالا فى عالم الإلكترونيات فى الوقت الحالى . وبما أن السيليكون أرخص سعرا وأسهل تصنيعا من زرنيخات الجاليوم ، فإن الأخير يستعمل فقط فى السرعات والترددات المرتفعة نظرا لزيادة حركية الإلكترونات به مقارنة بقيمتها فى السيليكون (أكثر من خمسة أضعاف) .

فى تكنولوجيا أشباه الموصلات ، يلزم أن تكون المواد بللورية تماما دون خلل ، كما يلزم أن تكون نقية . والنقاء فى هندسة الإلكترونيات لا يقاس بالنسبة المئوية كما هو الحال مثلا فى الكيمياء أو حتى فى الدواء ، ولكنه يقاس بعدد ذرات الشوائب المسموح بها فى المتر المكعب . تسمى بللورات أشباه الموصلات النقية ضمنية (Intrinsic) ، وفيها يتساوى عدد كل من حوامل الشحنات الحرة السالبة والموجبة . أى أن كثافة تواجد الإلكترونات الحرة "n" مساوية لكثافة تواجد الفجوات الحرة "p" ، أي أن :

$$n = p = n_i$$

حيث "n_i" يطلق عليها الكثافة الضمنية لتواجد حوامل الشحنة الحرة فى بللورات أشباه الموصلات الضمنية ، وتعتمد فقط على قيمة E_G ودرجة الحرارة . يلاحظ أن "$np = n_i^2$" ، وهذه العلاقة مهمة فى دراسة اتزان حوامل الشحنات داخل الجوامد .

أشباه الموصلات الضمنية فوائدها محدودة . فهى تصلح مثلا لبناء مقاومة تعتمد قيمتها على درجة الحرارة أو شدة الضوء ، وقد تكون هناك تطبيقات أخرى هامشية . التطبيق الأهم لأشباه الموصلات فى الإلكترونيات يكمن فى استعمال ما يسمى بأشباه الموصلات غير النقية أو غير الضمنية (Extrinsic) .

٥/٣ أشباه الموصلات غير الضمنية Extrinsic

أشباه الموصلات غير الضمنية أو غير النقية هى أساس تطبيقات أشباه الموصلات فى الإلكترونيات الحديثة . يجب ألا تؤخذ كلمة غير نقية هنا بمعناها الدارج . فالمقصود هنا هو أن نبدأ بأشباه موصلات نقية ، ثم نضيف الشوائب باختيارنا من حيث النوع والكمية . هناك نوعان من مواد الإضافة . نوع من العامود الخامس فى جدول

مندليف مثل الفوسفور والزرنيخ ، وهذه تسمى معطيات (Donors) . تخلق هذه المعطيات مستوى جديداً مسموحاً للإلكترونات فى فجوة الطاقة الممنوعة وقريب جدا من قاع حزمة التوصيل E_C ، وهذا يعطى إلكترونات حرة بسهولة لحزمة التوصيل . بذلك تصبح $n >> p$ مع الاحتفاظ بالعلاقة $np = n_i^2$ فى حالة الاستقرار . فى هذه الحالة تسمى n بحوامل الشحنات الأغلبية ، وتسمى p بحوامل الشحنات الأقلية ، وتسمى مادة شبه الموصل من نوع n (n-type) . النوع الآخر من مواد الإضافة يقع فى العمود الثالث من جدول مندليف مثل الإنديام والجاليوم ، وهذه تسمى متقبلات (Acceptors) . تخلق هذه المتقبلات مستوى طاقة جديداً مسموحاً للإلكترونات فى فجوة الطاقة الممنوعة وقريب جدا من قمة حزمة التكافؤ E_V . وهذا يتقبل إلكترونات بسهولة من حزمة التكافؤ ، أى أنه يخلق فجوات بسهولة فى حزمة التكافؤ . بذلك تصبح $p >> n$ ، مع الاحتفاظ أيضا بالعلاقة $np = n_i^2$ فى حالة الاستقرار . فى هذه الحالة تسمى p بحوامل الشحنات الأغلبية وتسمى n بحوامل الشحنات الأقلية ، وتسمى مادة شبه الموصل من نوع p (p-type) . فى شبه الموصل من نوع n يقع مستوى فيرمى فى النصف الأعلى من فجوة الطاقة الممنوعة ، ويسمى E_{fn} . بينما فى شبه الموصل من نوع p يقع مستوى فيرمى فى النصف الأسفل من فجوة الطاقة الممنوعة ويسمى E_{fp} . يوضح الشكل (٣-٧) مستويات الطاقة المختلفة فى المنطقة من قمة حزمة التكافؤ E_V إلى قاع حزمة التوصيل E_C لكل من شبه موصل ضمنى ، ونوع n ، ونوع p . ترتيب هذه الأنواع من أشباه الموصلات والمواجهة بين بعضها البعض وبين غيرها من المواد الموصلة والعازلة فى هياكل مختلفة هو أساس بناء النبائط الإلكترونية والدوائر الإلكترونية المتكاملة بكثافاتها المختلفة وتطبيقاتها المتغلغلة فى جميع أوجه الحياة كما سنرى فيما بعد .

Conduction band | Conduction band | Conduction band
E_C, E_{fi}, E_{fp}, E_A, E_V | E_C, E_D, E_{fn}, E_{fi}, E_V | E_C, E_{fi}, E_G, E_V
Valence band | Valence band | Valence band

جـ - نوع - p   ب- نوع - n   أ - ضمنى

شكل (٣-٧) : مستويات الطاقة فى أشباه الموصلات.

٤- النبائط الإلكترونية والدوائر المتكاملة

١/٤ مقدمة

النبيطة الإلكترونية – Electronic Device هى الوحدة الهيكلية المبنية على معارف وأسس طبيعية ورياضية لتأدية غرض مفيد فى الدوائر والنظم الإلكترونية . لذلك ، فإنها دائمة التطور مع تطور المعرفة فى الطبيعة والرياضيات ، وكذلك مع التطورات التكنولوجية . تحدث التطورات الخارقة على فترات متباعدة ، مثل التطور من الصمام الإلكترونى المفرغ إلى الترانزستور ، ومن الترانزستور إلى الدوائر المتكاملة . أما التطورات التكنولوجية فإنها دائمة ومستمرة ، مثل زيادة كثافة الدوائر المتكاملة إلى درجة بناء نظام إلكترونى كامل كالحاسب الآلى على شريحة من السيليكون مساحتها حوالى سنتيمتر مربع وسمكها ربع ملليمتر ، وغير ذلك مما هو قائم حاليا ومتوقع مستقبلا . جميع النبائط الإلكترونية القديمة والحديثة والمستقبلية تعتمد فى أدائها على التحكم فى توليد وتحريك وجمع الإلكترونات الحرة فى الفراغ أو داخل الجوامد بطريقة أو أخرى .

بدأ تاريخ ظهور النبائط الإلكترونية نتيجة للتطورات فى مجال آخر . ذلك أنه فى عام ١٨٧٠م قدم جيمس كلارك ماكسويل – James Clerk Maxwell توقعاته النظرية بإمكانية بث التموجات الكهرومغناطيسية فى أوساط مختلفة من بينها الفراغ . فى عام ١٨٨٧م ، حقق هينرتش هرتز – Heinrich Hertz هذه التوقعات معمليا . فى عام ١٨٩٧م ، نجح جوجليلمو ماركونى – Guglielmo Marconi فى تحقيق هذا ميدانيا بين بلدتين فى إنجلترا ، ثم بين الساحلين الأوروبى والأمريكى عبر المحيط عام ١٩٠١م . كان استقبال هذه التموجات يحتاج إلى نبيطة تمرر التيار الكهربى فى اتجاه واحد وتمنع مروره فى الاتجاه العكسى ، فيما تسمى بالمقوم – Rectifier .

وسط هذه الأجواء المتحفزة للبحث عن مقوم كفء لاستقبال التموجات الكهرومغناطيسية ، جاءت مشاهدة إديسون – Edison ، ففى عام ١٨٧٨م اخترع إديسون أول مصباح كهربائى للإضاءة مكوناً من فتيلة من الكربون فى وعاء زجاجى مفرغ . عند مرور تيار كهربى فى هذه الفتيلة ، فإنها تتوهج وتعطى الضوء المطلوب . فى عام ١٨٨٣م ، اكتشف إديسون أنه بوضع جسم معدنى أمام الفتيلة داخل المصباح يحدث التقويم المطلوب بين الجسم المعدنى والفتيلة . كانت مشاهدة إديسون هذه سببا فى بداية سلسلة من الصمامات الإلكترونية المفرغة ، استحوذت على نشاط هندسة الإلكترونيات فى أوائل القرن العشرين . ومازالت تكنولوجيا هذه الصمامات المفرغة

تستعمل فى تطبيقات خاصة حتى يومنا هذا . ففى عام ١٩٠٤م ، قام جون أمبروز فلمنج – John Ambrose Fleming (١٨٤٩ – ١٩٤٥م) ، مستنيرا بمشاهدة إديسون ، ببناء الصمام الثنائى المفرغ – High Vacuum Thermionic Diode المكون من وعاء مفرغ يحتوى على فتيلة ساخنة لبث الإلكترونات سميت «المهبط» ، ولوح معدنى أمامها لجمع هذه الإلكترونات سمى «المصعد» ، والذى يعمل كمقوم بكفاءة عالية . فى عام ١٩٠٧م ، أضاف ديفورست – Deforest شبكة معدنية بين المهبط والمصعد تتحكم فى شدة تيار المصعد . أطلق على هذه الوحدة الهيكلية الصمام الثلاثى ، وقد أفاد هذا بشدة فى استعمالات إلكترونية مهمة من أبرزها توليد وتكبير الإشارات الكهربية . أضيفت بعد ذلك شبكة ثانية فيما سمى بالصمام الرباعى ، ثم شبكة ثالثة فيما سمى بالصمام الخماسى ، وذلك لتحسين أداء الصمام فى الدوائر الإلكترونية .

أيضا ، من أوائل النبائط التى استعملت فى تقويم واستقبال الإشارات الكهرومغناطيسية ، وحدة هيكلية تنتمى إلى نبائط الجوامد أكتشفت بطريق الصدفة دون خلفية نظرية . فقد وجد بالتجربة أنه بلمس بعض البللورات من مواد معينة مثل الكوارتز فى نقاط معينة حساسة بسلك مدبب من معدن التانجستن يحدث التقويم المطلوب . كان الاسم المتداول لهذا السلك المعدنى المدبب هو «شارب القط – Cat's Whisker » ، ويلمس البللورة تحت ضغط زنبركى فى نقاط يمكن تغييرها بسهولة للحصول على أكفأ نقطة تلامس . ظل هذا المقوم ، مع التحسين سواء فى المادة البللورية أو طريقة التركيب ، يستعمل رغم وجود الصمام الثنائى وذلك لمميزاته عند الترددات العالية جدا . اكتسب هذا المقوم أهمية أكبر مع اكتشاف الرادار وتطوره السريع أثناء الحرب العالمية الثانية . كانت الأبحاث لتحسين أداء هذا المقوم هى السبب فى اكتشاف الترانزستور بطريق الصدفة عام ١٩٤٨م على أيدى كل من جون باردين – John Bardeen ووالتر براتين – Walter Brattain ووليم شوكلى – William Shockley وكان هذا أيضا ، بداية المسيرة إلى عصر الإلكترونيات الدقيقة الذى نعيشه الآن .

إذا تغاضينا عن الصمامات الإلكترونية الغازية التى كانت تستعمل أساسا فى التقويم وبعض الدوائر الرقمية البطيئة ، والتى انقرضت مع ظهور البدائل من نبائط أشباه الموصلات ، فإنه يمكن تقسيم النبائط الإلكترونية إلى قسمين أساسيين . القسم الأول يعتمد على حركة الإلكترونات الحرة بعد تركها سطح المهبط إلى الفراغ داخل أوعية زجاجية أو معدنية مفرغة . القسم الثانى يعتمد على حركة الإلكترونات الحرة (وقرائنها الفجوات) داخل الجوامد ، وعلى الأخص بللورات أشباه الموصلات . يمكن تصنيف

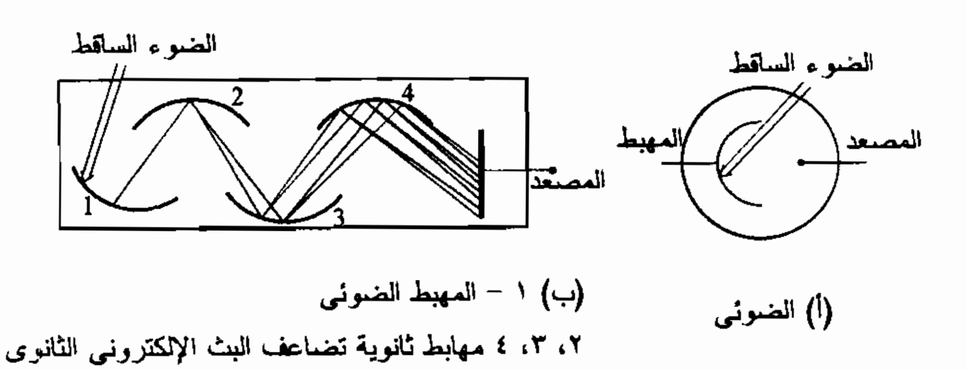
النبائط الإلكترونية أيضا من زوايا أخرى . فمثلا من زاوية التردد ، نرى أن نبائط الترددات المنخفضة حتى نهاية مدى الراديو تختلف عن نبائط الترددات الميكروية . ومن زاوية نوعية الأداء ، نجد العديد من أنواع النبائط منها نبائط التقويم ، نبائط التكبير ، نبائط الإحساس ، نبائط أو أنابيب العرض ، ونبائط أخرى خاصة مثل مولدات أشعة الليزر ومولدات أشعة إكس وغيرها .

بدأت نبائط الجوامد تحل محل الصمامات الإلكترونية المفرغة تباعا منذ الخمسينيات ، وعلى الأخص فى الدوائر والأجهزة والنظم المحدودة القدرة . وازداد هذا الإحلال مع الزمن حتى وصل فى أيامنا هذه إلى شبه تغطية كاملة فيما عدا بعض الحالات الخاصة . من هذه الحالات الخاصة ، الصمامات التى تعمل عند قدرات عالية فى محطات الإرسال الإذاعى ، ونبائط العرض مثل صمام أو أنبوبة أشعة المهبط – Cathode Ray Tube التى تستخدم بكثرة فى أجهزة القياس ، وصمام أو أنبوبة عرض الصورة التليفزيونية – TV Picture Tube ، وشاشات الحاسب ، وكذلك صمامات أو أنابيب توليد أشعة إكس .

٢/٤ النبائط الإلكترونية المفرغة

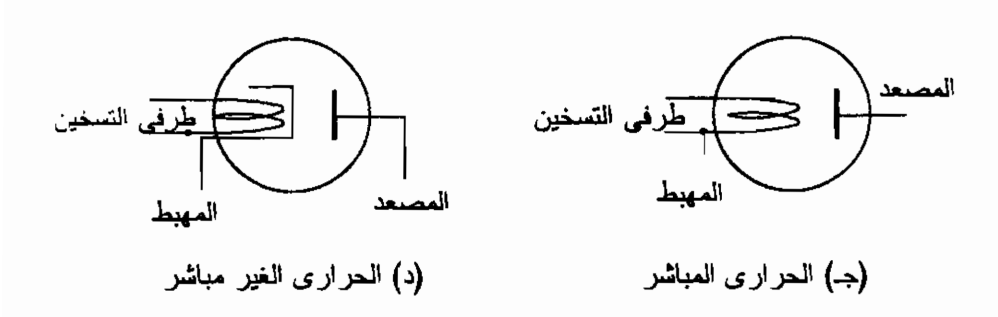
تشترك جميع النبائط الإلكترونية المفرغة فى احتياجها إلى مصدر لبث إلكترونات حرة . عادة يكون هذا المصدر جسماً من معدن التانجستين يسمى المهبط . يحتاج المهبط إلى طاقة خارجية لانتزاع أو بث إلكترونات خارج سطحه تمهيدا للتحكم فيها داخل الوعاء المفرغ حسب الاحتياج . يمكن أن يكتسب المهبط الطاقة المطلوبة بعدة طرق . فهناك البث الضوئى فيما يعرف بالصمامات الضوئية ، حيث يكتسب المهبط الطاقة اللازمة من الضوء الساقط على سطحه الذى تكون مساحته كبيرة بقدر الإمكان ومعالجاً بمواد خاصة لزيادة كفاءة البث الإلكترونى الضوئى ، شكل (٤-١)أ . وهناك البث الثانوى حيث يتسبب قذف سطح المهبط بإلكترونيات أولية سريعة الحركة فى بث كمية من الإلكترونات الثانوية أضعاف كمية الإلكترونات الأولية الساقطة ، وبتكرار ذلك داخل الصمام على مراحل يمكن الحصول على مضاعفات كبيرة فى المرحلة النهائية . كان هذا يستعمل فى الصمامات الضوئية المضاعفة – Photomultipliers الحساسة جدا للضوء ، شكل (٤-١)ب . وهناك البث الحقلى حيث تكون شدة المجال الكهربى عند سطح المهبط كافية لانتزاع إلكترونات خارجه . أما الأكثر شيوعا ، فهو البث الحرارى – Thermionic emission حيث تستعمل فتيلة من معدن التانجستن يتم تسخينها لدرجة التوهج بإمرار تيار كهربى خلالها . قد تستعمل هذه الفتيلة المتوهجة نفسها كمهبط فيما يسمى بالتسخين المباشر ، شكل (٤-١)ج ، أو تستعمل الفتيلة لتسخين مهبط معدنى محيط بها ومعزول عنها كهربيا فيما يسمى بالتسخين غير المباشر ، شكل (٤-١)د . عادة ، وخاصة فى صمامات الطاقات المنخفضة ،

يعالـــج السطح الفعال للمهبط بطرق تساعد على زيادة كفاءة البث الإلكترونى الحرارى ، وذلك بإضافة أكاسيد الثوريوم أو الباريوم والإسترنتيوم والكالسيوم مع إمرارها بدورات حرارية معينة لتثبيت فعاليتها .



(ب) ١ – المهبط الضوئى
٢، ٣، ٤ مهابط ثانوية تضاعف البث الإلكترونى الثانوى

(أ) الضوئى



(د) الحرارى الغير مباشر

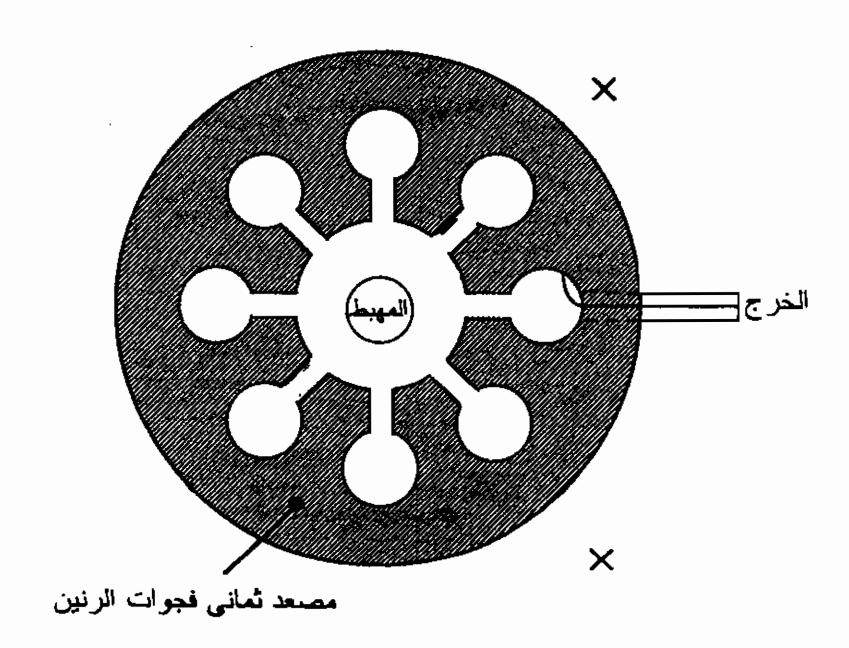
(جـ) الحرارى المباشر

شكل (٤-١) : البث الإلكترونى .

فى صمامات التقويم والتكبير المفرغة ، تثبت هياكل المصعد والشبكات أمام المهبط على أبعاد معينة محسوبة ، وتوصل أطرافها الخارجية فى الدوائر الإلكترونية بالجهود الكهربية اللازمة لأداء الأغراض المطلوبة . وكما قلنا سابقا ، فإن نبائط الجوامد حلت محل هذه الصمامات ، فيما عدا صمامات التكبير المستعملة عند القدرات العالية مثل المراحل النهائية فى محطات الإرسال الإذاعى حيث تصل الطاقات إلى عشرات ومئات وأحيانا آلاف الكيلو وات .

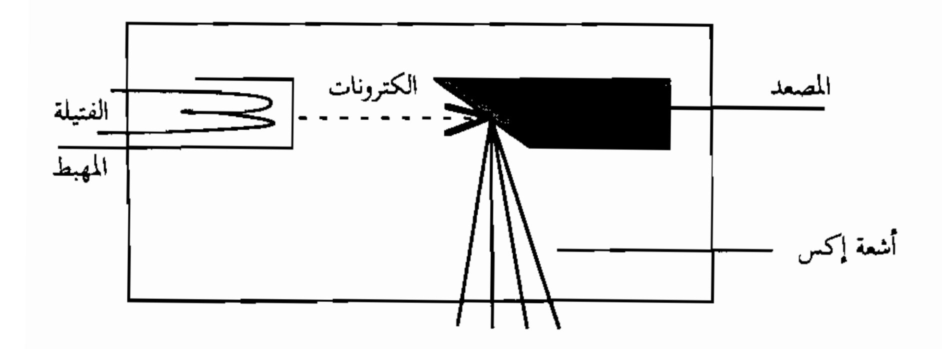
تعتمد صمامات الترددات الميكروية المفرغة فى عملها على قواعد مختلفة عن القواعد التى تعمل عليها صمامات التكبير المذكورة عند الترددات الأقل ، ولا مجال هنا للدخول فى مضمار هذه التفاصيل . وما يمكن قوله أن صمامات الترددات الميكروية ، مثلها مثل الصمامات الأخرى ، حلت محلها نبائط الجوامد المصنعة فى

هذه الحالة من المركب الشبه موصل زرنيخات الجاليوم – Gallium Aresnide (GaAs) . ذلك فيما عدا الطاقات العالية المستعملة مثلا فى الرادار وأفران الميكروويف ، فإنها لا تزال تستعمل صماماً مفرغاً يسمى الماجنترون ، مكوناً من فجوات رنين داخل كتلة معدنية تحيط بالمهبط . تمر الإلكترونات المنبثة من المهبط فى مسار دائرى بالقرب من مداخل فجوات الرنين تحت تأثير المجال الكهربى بين المهبط والكتلة المعدنية ومجال مغناطيسى عمودى عليه . بذلك تثار فجوات الرنين ويتولد فيها طاقة ميكروية مستمدة من طاقة تلك الإلكترونات ، شكل (٤-٢) .



شكل (٤-٢) الماجنترون

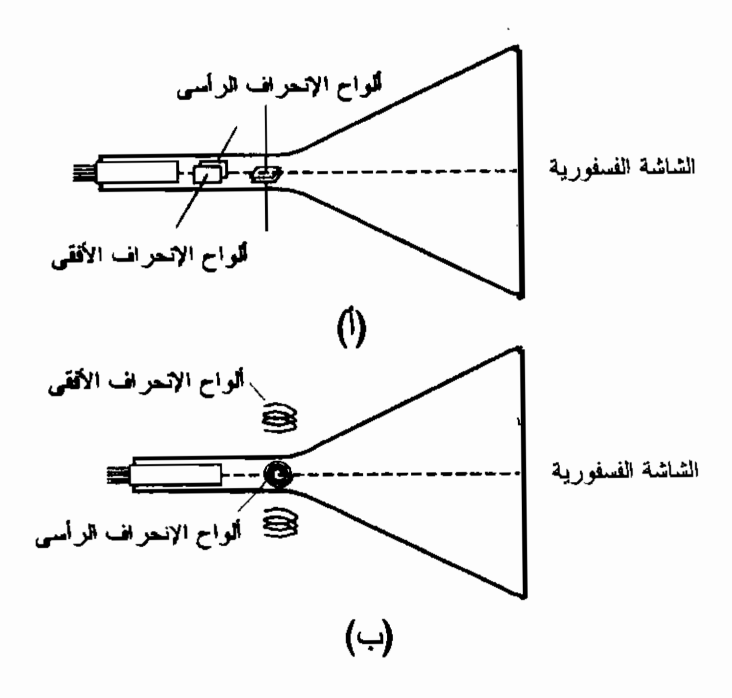
فى صمام توليد أشعة إكس ، يثبت أمام المهبط مصعد مكون من كتلة نحاسية أسطوانية مقطعها المواجه للمهبط مائل بزاوية ٤٥ درجة ومغلف بطبقة من التانجستن كما هو موضح بالشكل رقم (٤-٣) . بتوصيل جهد كبير بين المصعد والمهبط ، يقدر بالعشرات من الكيلو فولت ، تصل الإلكترونات إلى المصعد بطاقة فائقة كافية لإثارة إلكترونات المدارات العميقة داخل ذرات التانجستن ينتج عنها توليد أشعة إكس .



شكل (٤-٣) : صمام أشعة إكس .

بعض الصمامات الإلكترونية المفرغة ، مثل صمامات العرض ، تحتاج إلى شعاع إلكترونى مركز فى خيط دقيق ومنطلق بسرعة ثابتة عالية . الهيكل الذى يؤدى هذا الغرض يسمى المدفع الإلكترونى Electron Gun . يتكون هذا الهيكل من مهبط لبث الإلكترونات ومجموعة من المصاعد المعدنية المتوالية ، أسطوانية ومجوفة ، وكذلك شبكة بين المهبط ومجموعة المصاعد للتحكم فى شدة الشعاع . بتوزيع الجهد الكهربى على مجموعة المصاعد بطريقة معينة ، فإنها تعجل وتركز الإلكترونات أثناء مرورها فى محورها بحيث تخرج من المجموعة بمواصفات الشعاع المطلوب . يتكون صمام العرض المفرغ من وعاء زجاجى على شكل مخروطى له عنق ، شكل (٤-٤) . يوضع المدفع الإلكترونى فى طرف العنق عند مؤخرة الصمام . بعد خروج الشعاع الإلكترونى المركز والسريع من فوهة المدفع الإلكترونى فى اتجاه قاعدة المخروط ، يتم التحكم فيه بمجالات كهربية أو مغناطيسية حيث يمكن انحراف الشعاع فى اتجاهين متعامدين . إذا كان الانحراف يتم بمجال كهربى ، كما هو الوضع فى حالة صمامات القياس ، يوضع زوجان من الألواح المعدنية متعامدين فى عنق الصمام من الداخل قرب بداية الانفراج المخروطى ، شكل (٤-٤) أ ، حيث يتواجد المجالان الكهربيان المتعامدان نتيجة الجهد بين كل من اللوحين . إذا كان الإنحراف يتم بمجال مغناطيسى ، كما هو الوضع فى حالة صمام العرض التليفزيونى ، فإن ملفات الانحراف توضع على عنق الصمام من الخارج عند بداية الانفراج المخروطى ، شكل (٤-٤) ب ، حيث يتواجد المجالان المغناطيسيان المتعامدان نتيجة التيار المار فى كل ملف . مقدمة الصمام التى هى قاعدة المخروط ، وتسمى الشاشة ، مطلاة من الداخل بمادة فوسفورية كى تحول طاقة الشعاع الإلكترونى عند ارتطامه بها إلى نقطة ضوئية فى موضع الارتطام يمكن رؤيتها من الخارج أمام الشاشة . فى حالة عدم وجود أى انحراف ، تكون النقطة الضوئية فى مركز الشاشة . فى حالة وجود انحرافات إستاتيكية أو ديناميكية بطيئة أو سريعة ، يتولد على سطح الشاشة نقط أو رسومات ضوئية بأشكال تعتمد على قيمة وسرعة الانحرافين

المتعامدين . رغم أن جميع صمامات العرض المفرغة تشترك فى المبادئ الأساسية المذكورة . إلا أنها تختلف فى التفاصيل حسب التطبيق ، وذلك من ناحية شكل الشاشة ونوعية وتوزيع الطلاء الفوسفورى على سطحها الداخلى وهيكلة المدفع أو المدافع الإلكترونية وغير ذلك . كذلك يطلق على صمام العرض عدة أسماء حسب الاستعمال. فمثلا فى القياسات تسمى أنبوبة أشعة المهبط – Cathode Ray Tube ، وتستعمل لرسم العلاقة بين متغيرين فيما يشبه الرسوم البيانية . فى التليفزيون تسمى أنبوبة عرض الصورة – TV Picture Tube ، وتستعمل للعرض التليفزيونى الذى نراه ، مع اختلاف مواصفات الأنبوبة فى حالة العرض الأبيض والأسود عنها فى حالة الملون بطريقة لا مجال للتعرض لتفاصيلها هنا . فى الحاسب الإلكترونى تسمى الشاشة ، وتستعمل لمتابعة ما يجرى داخل الحاسب وعرض ما نحتاجه من بيانات .



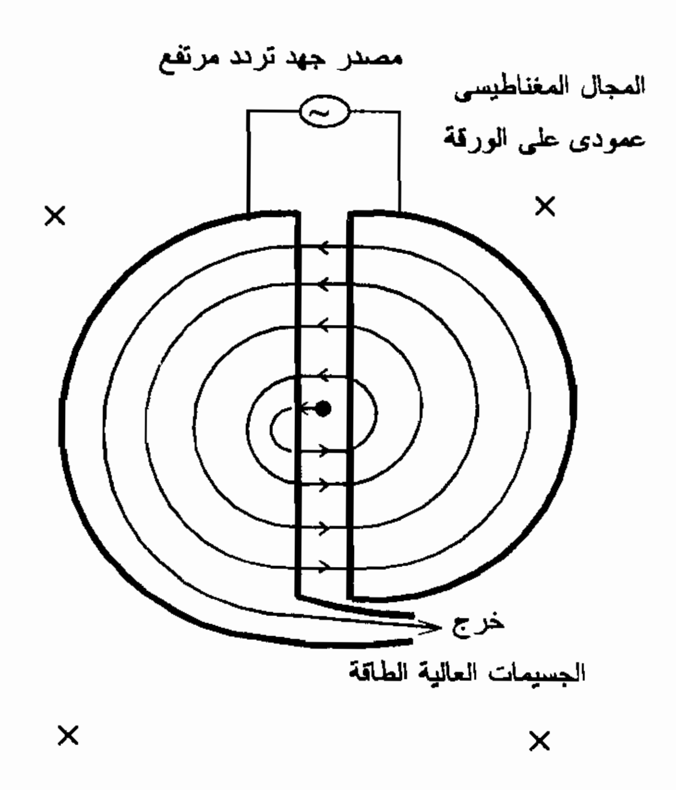
شكل (٤-٤) صمام أشعة المهبط.

أ- الانحراف بمجال كهربائى.

ب- الانحراف بمجال مغناطيسى.

يمكن أيضا مع الفارق ، اعتبار معجلات الجسيمات المشحونة – Particle Ac-celerators ، المستعملة فى الطاقة النووية ، ضمن الصمامات الإلكترونية المفرغة .

وهذه نوعية خاصة الهدف منها هو إعطاء الجسيمات المشحونة سرعات فائقة لاستخدامها كقذائف لتحطيم الذرة ، واستخدامات أخرى فى الأبحاث والتطبيقات النووية . مثال ذلك السيكلوترون – Cyclotron الذى يتكون من جزءين معدنيين داخل وعاء مفرغ، كل منهما نصف دائرى ومجوف ومعزولين كهربائيا عن بعضهما. يبدأ الجسم المشحون رحلته من المركز كما هو موضح بشكل (٤–٥) تحت تأثير جهد كهربى عند تردد مرتفع بين نصفى الدائرة ، ومجال مغناطيسى عمودى عليهما . وهذا يتسبب فى اجتياز الجسم المشحون مسار عدد كبير من الدوائر داخل تجويف نصفى الدائرة ، حيث يكتسب زيادة فى السرعة كل مرة يمر فيها فى الفراغ بين نصفى الدائرة ، ويخرج فى النهاية بسرعة وطاقة فائقة حسب الطلب . ورغم أن قطر السيكلترون يقدر بالأمتار ، فإن الجسيمات المشحونة تقطع مسافة فى الدوائر المتعددة تقدر بالأميال .



شكل (٤–٥) : السيكلوترون .

٣/٤ نبائط الجوامد الإلكترونية

بدأت الرحلة فى اتجاه نبائط الجوامد الإلكترونية بطريق الصدفة عام ١٩٤٨م . ذلك أنه أثناء قيام كل من جون باردين – John Bardeen ووالتر براتين – Walter Brattain بأبحاث معملية بمعامل بل – Bell Laboratories بالولايات المتحدة الأمريكية لتحسين أداء الثنائى البللورى بتحريك شوارب القط – Cat's Whiskers

على سطح البللورة لوحظ أمر لم يكن متوقعا . فقد لوحظ أثناء تقارب شاربين ، ومرور تيار كهربى فى الاتجاه الأمامى لأحدهما ، فإن هذا يتسبب فى إمرار تيار كهربى مساو فى الشارب الآخر رغم انحيازه فى الاتجاه الخلفى . تساوى التيار ، مع التحول من مقاومة منخفضة فى المدخل إلى مقاومة مرتفعة فى المخرج ، يتسبب فى الحصول على تكبير فى الجهد والطاقة . وبما أن تحول المقاومة – TRANsfer reSISTOR هو السبب فى هذا التكبير ، فقد اشتق منها اسم النبيطة المستحدثة وهو ترانزستور – TRANSISTOR . أحدث هذا الاكتشاف دويا فى حينه ، وبسببه حصل باردين وبراتين بالاشتراك مع وليم شوكلى – William Shockley على جائزة نوبل فى الطبيعة عام ١٩٥٦م .

كما هو متوقع ، أثار هذا الاكتشاف عديداً من الباحثين الذين قاموا بسيل من التجارب المعملية والتأليف والنشر فيما كان يسمى «ترانزستور اتصال النقطة – Point Contact Transistor » حيث إن الاتصال ببللورة الجيرمانيوم كان عند نقطتين متقاربتين . كانت الأبحاث فى معظمها معملية ، ولم تكن هناك قواعد نظرية واضحة وثابتة لبناء هذا الترانزستور ، مما جعله يعتمد أكثر على الحظ مع صعوبة تكرار المواصفات نفسها حتى تحت ظروف البناء نفسها . جاءت الدفعة القوية عام ١٩٥٢م عندما قدم وليم شوكلى نظريته لما يسمى وصلة "pn" والترانزستور المبنى على أساسها ، وكلاهما يرتكز على قواعد علمية ثابتة . بذلك اختفى تماما ترانزستور اتصال النقطة ، وتطورت نبائط الجوامد الإلكترونية إلى ما نراه فى أيامنا هذه .

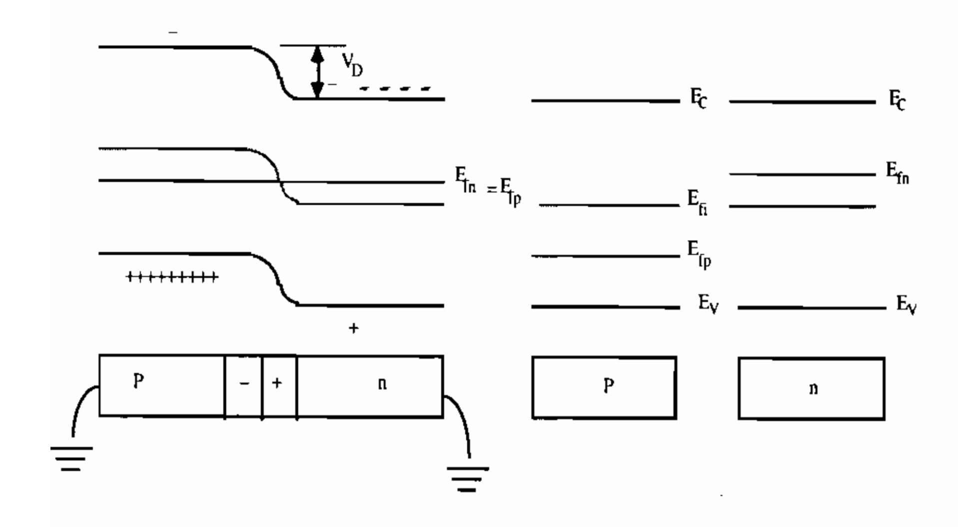
كما ألمحنا سابقا ، فإن نبائط الجوامد الإلكترونة مبنية أساسا من بللورات أشباه الموصلات السليمة البنية الهيكلية من حيث تكرار الخلية البللورية فى نسق منتظم دون خلل ، على الأقل فى مدى الحيز الذى تشغله النبيطة . هذا هو المعتاد ، وفيما عدا ذلك فهو الاستثناء . هذا مع العلم أنه عند إضافة ذرات شوائب المعطيات – Donors أو المتلقيات – Acceptors لخلق أشباه موصلات من نوع "n" أو نوع "p" على التوالى فإن ذرات هذه الشوائب تدخل فى الهيكل البللورى كبدائل لبعض ذرات شبه الموصل دون الإخلال بانتظام الهيكل البللورى نفسه . ويطلق على ذرات الشوائب بالذرات المضافة ، وذرات شبه الموصل بالذرات المضيفة . كما قلنا سابقا ، فإن مادة شبه الموصل المتجانسة ، سواء ذاتية – Intrinsic أو غير ذاتية – Extrinsic (أى من نوع "n" أو "p") ، لا تصلح وحدها فى خلق نبيطة إلكترونية . كى نحصل على نبيطة إلكترونية ، يلزم تواجد عدم استمرارية فى نوعية شبه الموصل البللورى ، أو مواجهة بين أوساط مختلفة أحدها على الأقل شبه موصل بللورى . من أهم وأشهر عدم الاستمرارية هو الانتقال داخل بللورة شبه الموصل من شبه موصل من نوع "p"

مثلا إلى شبه موصل من نوع "n" دون المساس بانتظام الهيكل البللورى . يمكن أن يكون هذا الانتقال مفاجئاً أو متدرجاً ، وفى كلا الحالتين تسمى منطقة الانتقال «بالوصلة pn Junction - pn » . من ناحية المواجهة بين شبه موصل وأوساط أخرى ، هناك نوعان : النوع الأول « معدن – شبه موصل / Metal-Semicondutor » ويرمز له بالرمز "MES" ، والنوع الثانى «معدن – عازل – شبه موصل / Metal Insula-tor-Semiconductor » ويرمز له بالرمز "MIS" ، وإذا كان العازل أكسيد السيليكون Silicon Oxide (SO_2) يرمز له بالرمز "MOS" وهذا هو الأكثر إستعمالا حينما يكون شبه الموصل من مادة السيليكون .

النبائط المبنية علي أساس وصلة أو وصلات "pn" تعتمد فى أدائها على التحكم فى ارتفاع الجهد الحاجز لحوامل الشحنات الحرة عند الوصلة بواسطة الجهد الخارجى بين طرفى الوصلة، وبالتالى التحكم فى التيار الكهربى الناتج من مرور إلكترونات حرة فى اتجاه وفجوات حرة فى الاتجاه المضاد. وبما أن التيار الكهربى فى هذه النوعية من النبائط يتكون من تحركات إلكترونات حرة سالبة وفجوات حرة موجبة، فإنها أحيانا تسمى «النبائط الثنائية الإستقطاب Bipolar Devices » .

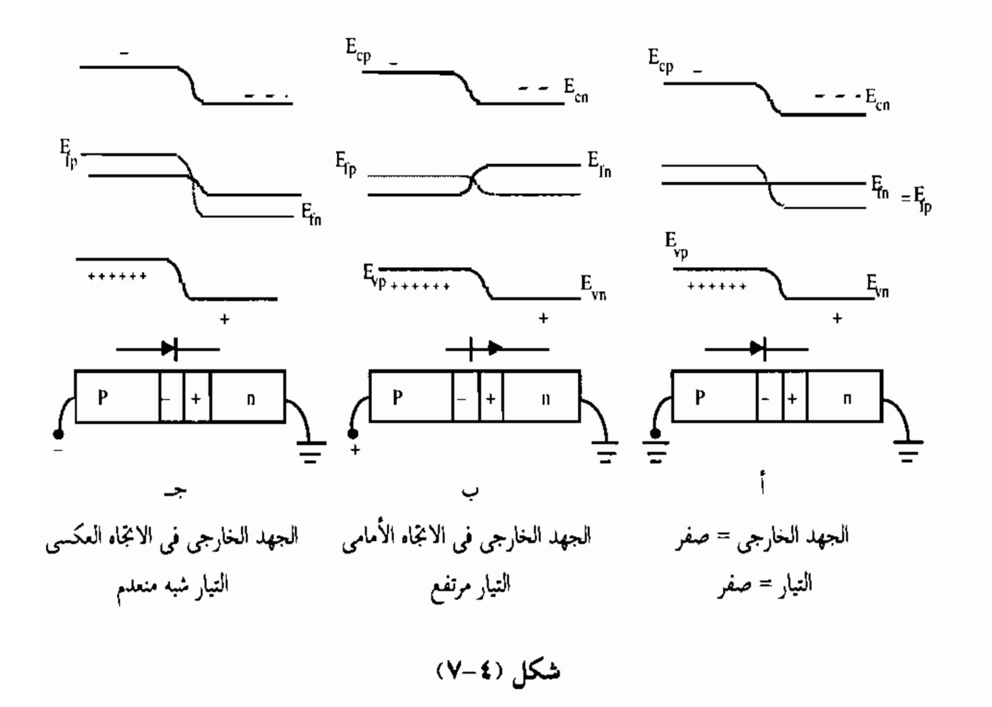
النبائط المبنية على أساس المواجهة بين شبه موصل وأوساط أخرى تعتمد فى أدائها على التحكم فى قناة توصيل بمجال كهربائى عمودى على القناة ، نتيجة جهد كهربى على بوابة التحكم ، وبالتالى فى التيار الكهربى بين طرفين أو جزيرتين من نوع القناة نفسه . لذلك فإن هذه النبائط أحادية الاستقطاب إما من نوع القناة "n" أو من نوع القناة "p" .

فى أى مادة أو مجموعة من المواد المتصلة فى حالة استقرار ذاتى مع عدم التعرض لمؤثرات أو جهود خارجية ، فإن مستوى فيرمى للطاقة (السابق تعريفه) يتساوى فيها جميعا . وهذا يمكن تشبيهه بالأوانى المستطرقة حيث ، فى حالة الاستقرار ، يتساوى سطح السائل فى جميع الأوانى المتصلة . إذا طبقنا هذه الحقيقة على وصلة "pn" ، وبالرجوع إلى الشكل رقم (٤-٦) ، فإن هذا يؤدى إلى خلق جهد داخلى بين مستويات الطاقة فى كل من طرفى الوصلة . يسمى هذا الجهد الداخلى «جهد الانتشار – Diffusion Potential (V_D) » حيث يمنع انتشار الالكترونات من اليمين إلى اليسار وكذلك الفجوات من اليسار إلى اليمين ، وبذلك تكون قيمة التيار الكهربى صفر . كذلك تتكون أيضا منطقة عازلة حول طرفى الوصلة بها شحنات كهربية أيونية ثابتة غير حرة موجبة فى ناحية "n" وسالبة فى ناحية "p" .



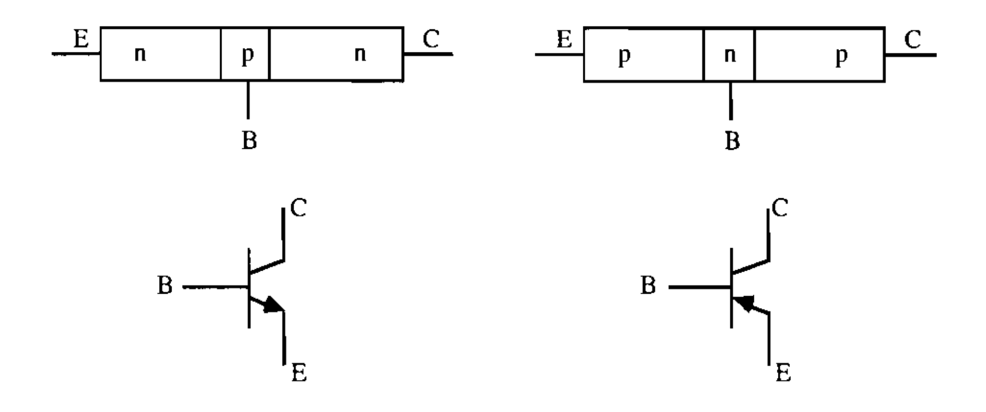
شكل (٤-٦)

هنا ، تجدر الإشارة إلى أن مستويات الطاقة الموضحة مبنية على أساس الشحنات السالبة . لذلك ، كما ذكرنا سابقا ، فإن الإلكترونات تنزلق ذاتيا بسهولة إلى أسفل عند أى حاجز ، وتحتاج إلى طاقة خارجية كى تتسلق إلى أعلا ، بينما تطفو الفجوات الموجبة ذاتيا بسهولة إلى أعلا عند أى حاجز ، وتحتاج إلى طاقة خارجية كى تنزلق إلى أسفل. كذلك ، فإن مستوى فيرمى ينخفض فى ناحية الجهد الخارجى الموجب ، ويرتفع فى ناحية الجهد الخارجى السالب . إذا طبقنا هذه الحقائق على وصلة "pn" ، فإننا نصل إلى الشكل (٤ - ٧) . في الشكل رقم (٤-٧) أ ، لا يوجد جهد خارجى بين طرفى الوصلة والتيار الكهربى صفر . فى الشكل (٤-٧) ب ، تم توصيل الطرف "p" بجهد خارجى موجب ينتج عنه انخفاض فى الجهد الحاجز بقيمة الجهد الخارجى نفسه مما يساعد على انتشار بعض الإلكترونات إلى اليسار وبعض الفجوات إلى اليمين ويتسبب فى مرور تيار كهربى أمامى ملموس . فى الشكل (٤-٧) ج ، تم توصيل الطرف "p" بجهد خارجى سالب ينتج عنه ارتفاع فى الجهد الحاجز بقيمة الجهد الخارجى نفسه مما يزيد فى منع انتشار الإلكترونات إلى اليسار أو الفجوات إلى اليمين ، ويكون التيار الكهربى تقريبا منعدماً فيما عدا ما يسمى بتيار التشبع العكسى الضئيل نتيجة حوامل الشحنات الأقلية فى طرفى الوصلة . من هذا يتضح أن وصلة "pn" لها خــواص التقويم ، وتسـمى «ثنائى شبه الموصل - Semiconductor Diode » ، ولها عديد من الاستعمالات فى حد ذاتها .



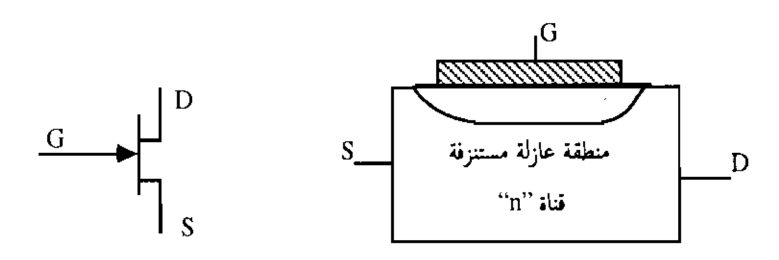
شكل (٤-٧)

لبناء ترانزستور على أساس وصلة "pn" ، فإنه يلزم تواجد وصلتين متقاربتين جدا لبعضهما فى بناء بللورى منتظم لنحصل على أحد الهيكلين "pnp" أو "npn" . بتوصيل جهود انحياز خارجية بحيث تكون إحدى الوصلتين منحازة فى الإتجاه الأمامى الذى يسمح بمرور تيار كهربى ، والوصلة الأخرى منحازة فى الاتجاه العكسى ، فإن تيار الوصلة الأولى المنخفضة المقاومة يصل بأكمله تقريباً إلى الوصلة الثانية المرتفعة المقاومة بسبب صغر المسافة بين الوصلتين ، وبذلك يحدث تكبير للجهد والطاقة . فى هذه الترانزستورات ، تسمى الوصلة المنحازة فى الاتجاه الأمامى «بوصلة البعث – Emitting Junction » ويسمى الطرف المتصل بها «الباعث – Emitter (E) » ، وتسمى الوصلة المنحازة فى الاتجاه الخلفى « بوصلة الجمع -- Collecting Junc-tion » ويسمى الطرف المتصل بها «الجامع – Collector (C) » ، وتسمى المنطقة بين الوصلتين والطرف المتصل بها «القاعدة – Base (B) » . يوضح الشكل رقم (٤-٨) النموذجين الطبيعيين لترانزستورات "pnp" و "npn" ورمز كل منهما فى الدوائر الإلكترونية .



شكل (٤-٨)

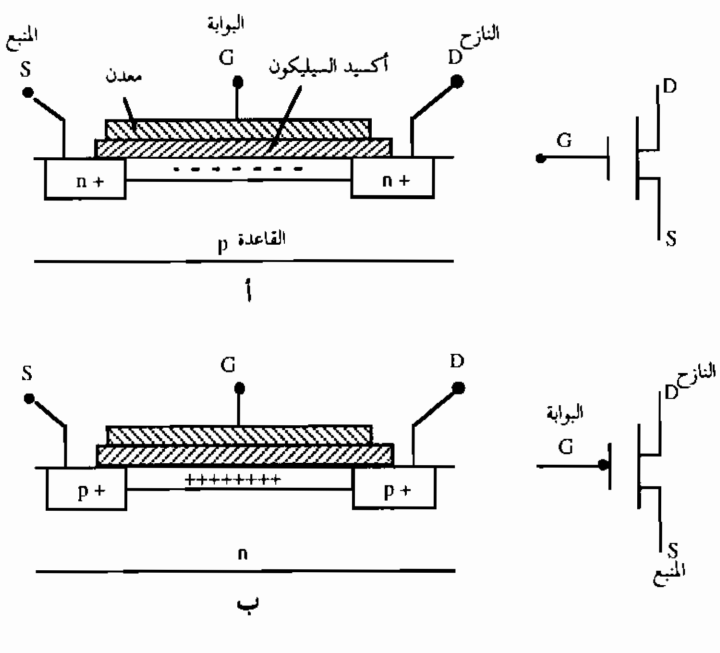
حسب نوع المعدن وشبه الموصل ، يمكن أن تكون المواجهة «معدن – شبه موصل » وصلة عادية تتبع قانون أوم، وبذلك تسمى «وصلة أومية – Ohmic Con-tact » ، وهذه مطلوبة فى التوصيلات المعتادة . ويمكن أن تكون لهذه المواجهة خاصية التقويم كثنائى وفى هذه الحالة تسمى «ثنائى شوتكى – Schottky Diode » وهذا مطلوب فى حد ذاته كمقوم ، كما أنه أساس بناء ترانزستور حقلى يرمز له "MESFET" يستعمل كثيرا عند الترددات الميكرووية حيث تكون مادة شبه الموصل هى مركب «زرنيخات الجاليوم – Gallium Arsenide (GaAs) » . فى هذا الترانزستور تستعمل وصلة شوتكى كبوابة "Gate-(G)" للتحكم فى سعة قناة التوصيل بين المنبع "Source (S)" والنازح "Drain (D)" ، ويتأتى ذلك بالتحكم فى عرض منطقة الاستنزاف العازلة على سطح شبه الموصل بجوار المعدن . يوضح الشكل (٤-٩) نموذجاً طبيعياً مبسطاً لهذا الترانزستور ورمزه فى الدوائر الإلكترونية .



شكل (٤-٩)

للمواجهة الهيكلية «معدن– أكسيد السيليكون – شبه موصل – Metal-Oxide

Semiconductor (MOS) » فى حد ذاتها صفة المكثف ، وأحيانا تستعمل فعلا كمكثف. ولكن الاستعمال الأهم لها هو بناء ترانزستور حقلى يرمز له "MOSFET". لبناء هذا الترانزستور ، يزرع على سطح القاعدة جزيرتان من نوع مخالف لنوع شبه موصل القاعدة ، تسمى إحداهما المنبع – Source والأخرى النازح – Drain . يستعمل المعدن كبوابة لخلق قناة توصيل عند سطح شبه موصل القاعدة بين الجزيرتين، والتحكم فيها . الخلق والتحكم فى قناة التوصيل يتم نتيجة المجال الكهربى الناتج من جهد البوابة والعمودى على اتجاه القناة حيث يتسبب فى انحناء مستويات الطاقة قرب سطح القاعدة ، وهذا بدوره يحدث انعكاساً فى نوعية شبه الموصل عند السطح مكوناً قناة التوصيل التى يعتمد سمكها وبالتالى التيار الكهربى المار خلالها على جهد البوابة . هناك نوعان من هذا الترانزستور . النوع الأول تكون القاعدة فيه من نوع "p" والجزيرتان والقناة من نوع "n" ، ويسمى ترانزستور حقلياً ذا قناة "n" ويرمز له بالرمز "NMOS" ، والنوع الثانى تكون القاعدة فيه من نوع "n" والجزيرتان والقناة من نوع "p" ، ويسمى ترانزستور حقلياً ذا قناة "p" ويرمز له بالرمز "PMOS" . فى كلتا الحالتين ، إذا كانت قناة التوصيل أصلا متواجدة وتتحكم فيها البوابة بالزيادة والنقصان يسمى الترانزستور من نوع «الاستنزاف – "Depletion" ، أما إذا كانت قناة التوصيل أصلا غير متواجدة وتتواجد فقط عند جهد معين للبوابة التى تتحكم فيها بعد ذلك بالزيادة والنقصان يسمى الترانزستور من نوع «الإعزاز – Enhancement » . يوضح الشكل (٤–١٠) أ ، ب النموذجين الطبيعيين للترانزستورين من نوع القناة "n" والقناة "p" ورمزهما فى الدوائر الإلكترونية .



شكل (٤–١٠)

لا يفوتنا هنا أن نتعرض سريعاً لنبيطة إلكترونية خاصة ، لها تطبيق عملى مهم . هذه النبيطة تسمى أحيانا الخلية الضوئية – Photo Cell ، وأحيانا الخلية الشمسية Solar Cell– ، وأحيانا الخلية الفولتية – Voltaic Cell . هذه النبيطة أو الخلية ، فى معظم الأحيان ، ما هى إلا وصلة pn عادية مبنية على رقيقة بأكملها بحيث تكون الوصلة قريبة من السطح المعرض للإشعاع الضوئى أو الشمسى . الموصل المعدن ناحية الوصلة يكون على شكل أصابع متفرقة تسمح بمرور الأشعة من بينها . عندما تسقط الأشعة على منطقة الوصلة تتولد ثنائيات من الإلكترونات والفجوات الحرة ينجذبان إلى طرفى الوصلة ، ويولدان بذلك جهداً كهربيًا بينهما . حينما يكون طرفى الوصلة غير متصلتين ، يكون التيار صفراً والجهد أعلا قيمة ، ويسمى جهد الدائرة المفتوحة V_o . حينما يتلامس الطرفان قصرا ، يكون الجهد صفراً والتيار أعلا قيمة ، ويسمى تيار القصر I_{sc} . تستعمل الخلية عمليا عند حمل معين بحيث يكون الجهد V_L أقل من V_o والتيارI_Lأقل من تيار القصر I_{sc} ، ولكن حاصل ضربهما $V_L I_L$ ، الذى يمثل القدرة ، أعلا ما يمكن . وكما قلنا ، فهذه النبيطة لها تطبيق عملى مهم فى استغلال الطاقة الضوئية والشمسية لتوليد الطاقة الكهربية .

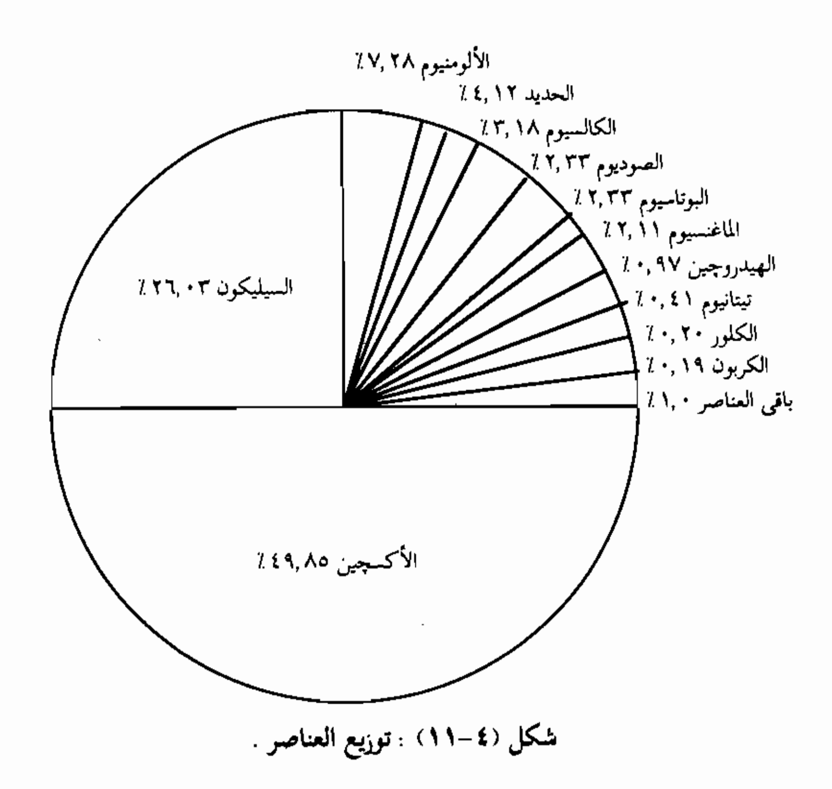
٤/٤ الدوائر المتكاملة

لولا النجاح فى استعمال السيليكون بدلا من الجيرمانيوم، فى نهاية الخمسينيات ، كشبه موصل لصناعة الترانزستورات ، لما تطورت الدوائر المتكاملة إلى ما نراه فى أيامنا هذه . تأخر استعمال السيليكون فى البداية لصعوبة تحضيره كبللورة نقية ، بالإضافة إلى انخفاض حركية الإلكترونات "u_n" والفجوات "u_p" به مقارنة بقيمهما فى الجيرمانيوم. يوضح الجدول (٤–١) المقارنة بين خواص الجيرومانيوم والسيليكون المؤثرة فى أداء

جدول (٤–١)

الخاصية	الجيرمانيوم	السيليكون	الوحدة	الميزة
الرقم الذرى	٣٢	١٤	–	–
الوزن الذرى	٧٢,٦	٢٨,٠٨	–	–
الكثافة	٥٣٢٠	٢٣٣٠	كيلوجرام / متر٣	السيليكون أخف وزناً
شدة مجال الانهيار	$١٠^{٧}$	٣٠×١٠^{٧}	فولت / متر	السيليكون أكثر تحملا للجهد الكهربى
ثابت العزل النسبى E_r	١٦	١١,٨	–	–
عرض الطاقة الممنوعة	٠,٦٨	١,١٢	إلكترون فولت (eV)	تيار التشبع العكسى أقل
n_i	$٢,٤ \times ١٠^{١٩}$	$١,٥ \times ١٠^{١٦}$	متر–٣	للسيليكون
μ_n	٠,٣٩	٠,١٥	متر٢ / فولت ثانية	سرعة حوامل الشحنات
μ_p	٠,١٩	٠,٠٤٥	متر٢ / فولت ثانية	أسرع فى الجيرمانيوم
معامل التمدد الحرارى	$٥,٨ \times ١٠^{-٦}$	$٢,٦ \times ١٠^{-٦}$	°م–١	أبعاد السيليكون أقل تأثراً بالحرارة
معامل التوصيل الحرارى	٦٠	١٥٠	وات / متر °م	السيليكون قادر على العمل عند طاقات أعلى
درجة حرارة الإنصهار	٩٥٨	١٤١٢	°م	السيليكون قادر على العمل عند درجات حرارة أعلى

الترانزستورات المصنعة من أى منهما . من هذا الجدول ، يتضح أن السيليكون يتميز على الجيرمانيوم كمادة لصناعة الترانزستورات فى سبعة بنود مقابل بند واحد يتميز فيه الجيرمانيوم . إذا أضفنا إلى ذلك حقيقة أن السيليكون متوفر بكثرة فى الطبيعة ، بنسبة حوالى ٢٦ ٪ حيث يأتى فى الدرجة الثانية فقط بعد الأكسچين المتواجد فى الطبيعة بنسبة حوالى ٥٠ ٪ ، فى حين أن الجيرمانيوم شحيح للغاية، كما هو موضح بالشكل (٤-١١) ، كذلك سهولة تكوين اكسيد السيليكون الذى له خاصية عزل كهربى



شكل (٤-١١) : توزيع العناصر .

ممتازة وصلابة ميكانيكية قوية ، كل هذا وغيره يرشح السيليكون كبديل متفوق بكثير على الجيرمانيوم لصناعة النبائط الإلكترونية رغم انخفاض "u_n" و"u_p" . أدى ذلك إلى نشاط كبير لاستخلاص وتجهيز السيليكون البللورى . ما أن تقدمت تكنولوچيا استخلاص وتجهيز السيليكون البللورى النقى بطرق اقتصادية ، حتى حل محل الجيرمانيوم الذى اختفى تماماً كمادة لصناعة النبائط الإلكترونية . فى الأيام الأولى للترانزستور ، حيث كان استعمال الجيرمانيوم هو المعتاد ، كانت تصنع وصلات pn بطرق من أهمها انتشار الشوائب بالتسخين أو تغذية الجيرمانيوم المنصهر تباعاً بالشوائب عند بناء البللورات بالسحب . بقدوم السيليكون ، وإمكانية أكسدة سطحه بطبقة من أكسيد السيليكون المميز ، تطورت تكنولوچيا صناعة الترانزستور . ففى عام ١٩٦٠م تبلورت ما يسمى «التكنولوچيا السطحية – Planar Technology » . كان هذا فى

حد ذاته نقلة تكنولوچية رائعة فى تصنيع الترانزستورات المنفردة ، حيث أمكن تصنيع الآلاف منها فى مسيرة عملية واحدة . فى التكنولوچيا السطحية يبدأ التصنيع برقائق دائرية من السيليكون البللورى سمكها ٢٥٠ ميكرون (ربع ملليمتر) من نوع "n" أو "p" حسب نوع الترانزستورات المراد تصنيعها npn أو pnp . يتم تغطية الرقائق بطبقة من أكسيد السيليكون فى أفران خاصة عند درجة حرارة ١١٠٠م مع تواجد تيار من الأكسچين الرطب . يتبع ذلك تغطية الأكسيد بطبقة مقاومة للضوء (Photo Resist) واستعمال تكنولوچيا الطباعة الحجرية الضوئية (Photolithography) ومواد كيميائية لتحديد وتعرية أماكن الحقن . يتم حقن الشوائب فى أفران خاصة . يعاد تغطية الرقائق مرة أخرى بطبقة جديدة من أكسيد السيليكون ، وتكرر الخطوات السابقة حتى يتم تصنيع النبيطة المطلوبة . فمثلاً ، عند تصنيع ترانزستورات من نوع npn ، تكون البداية رقائق دائرية من بللورات السيليكون من نوع "n" . كان قطر الرقيقة فى بداية التكنولوچيا السطحية بوصة واحدة ، وصل إلى ٣ بوصات عند بداية الدوائر المتكاملة فى الستينيات ، ووصل حاليا فى التسعينيات إلى ١٢ بوصة . يمكن إيجاز خطوات تصنيع ترانزستورات التكنولوچيا السطحية من نوع npn كما يلى :

١- تؤكسد أسطح الرقائق من نوع "n" بوضعها فى أفران عند درجة حرارة ١١٠٠م لمدة تعتمد على السمك المطلوب لطبقة أكسيد السيليكون .

٢- تغطية الرقائق بعد ذلك بمادة مقاومة ضوئية (Photo Resist) .

٣- يستخدم قناع وطرق طباعة حجرية ضوئية (photolihography) لتحديد أماكن قواعد الترانزستورات ، وتستخدم مواد كيميائية لحفر وانتزاع الأكسيد من تلك الأماكن .

٤- تحقن تلك الأماكن بشوائب المتلقيات لخلق مناطق من نوع "p" . يتم ذلك فى أفران خاصة لهذه الشوائب منعاً للتلوث .

٥- يعاد أكسدة أسطح الرقائق مرة ثانية .

٦- تغطى الرقائق بمادة مقاومة ضوئية .

٧- يستخدم قناع ثان وطرق طباعة حجرية ضوئية لتحديد أماكن بواعث الترانزستورات ومواد كيميائية لحفر وانتزاع الأكسيد من تلك الأماكن .

٨- تحقن تلك الأماكن بشوائب المعطيات لخلق أماكن من نوع "n" . يتم ذلك فى أفران خاصة لهذه الشوائب منعاً للتلوث .

٩- يعاد أكسدة أسطح الرقائق مرة ثالثة .

١٠- تغطى الرقائق بمادة مقاومة ضوئية .

١١- يستخدم قناع ثالث وطرق طباعة حجرية ضوئية لتحديد أماكن ارتكاز التوصيلات الكهربية ، ومواد كيميائية لحفر وانتزاع الأكسيد من تلك الأماكن .

١٢- يغطى سطح الرقائق بطبقة من الألمونيوم بطريقة التبخير فى حيز مفرغ .

١٣- يستخدم قناع رابع عكسى للقناع الثالث لحفر الألمونيوم من سطح الرقائق فيما عدا أماكن ارتكاز التوصيلات الكهربية .

١٤- فى النهاية ، يتم قطع الرقائق بآلة ماسية للحصول على شرائح الترانزستورات المنفردة .

١٥- توضع كل شريحة على حامل له ثلاثة أطراف خارجية معزولة ، يتم توصيل كل منها بنقاط ارتكاز التوصيلات الكهربية لكل من الباعث والقاعدة والجامع ، ثم يتم تغليف كل ترانزستور على حده .

يلاحظ أن عملية تصنيع الترانزاستورات المنفردة بالتكنولوچيا السطحية تحتاج إلى أربعة أقنعة يلزم لتجهيزها دقة فى تكنولوچيا التصوير . كما يلاحظ أنه كلما ازداد قطر الرقيقة ازداد الإنتاج .

كان الانتقال من التكنولوچيا السطحية المستعملة فى صناعة الترانزستورات المنفردة إلى الدوائر المتكاملة منطقيًا ومتوقعاً . فالأسئلة التى بدأت تطرح نفسها هى : لماذا نقطع الرقيقة إلـى ترانزستورات منفردة ثم نعود ونوصلها بمقاومات وأسلاك لبناء دوائر إلكترونية ؟ لماذا لا نتركها مكانها ونبنى حولها على الرقائق المقاومات المطلوبة نفسها باستعمال مناطق فى مادة شبه الموصل تفى بهذه الأغراض والتوصيل بينها بخطوط معدنية ، وبذلك نحصل على دوائر متكاملة بدلا من ترانزستورات منفردة ؟

طرحت فكرة الدوائر المتكاملة لأول مرة فى مؤتمر علمى للمكونات الإلكترونية عقد بواشنطن عام ١٩٥٢م . ورغم أن الفكرة كانت عابرة ، إلا أنها ألقت بنورها فى أذهان الباحثين ، وأوجدت بينهم سباقاً خفيًا والشعور بأهمية السبق فى تحقيق ذلك . وعلى الرغم من أن الجيرمانيوم كان هو مادة شبه الموصل المستعملة فى تلك الحقبة ، فقد تمكن بعض الباحثين من بناء دوائر إلكترونية متكاملة بسيطة على قواعد من الجيرمانيوم البللورى . من أبرز هؤلاء الباحثين جاك كيلبى – Jack Kilby الذى تمكن فى سبتمبر عام ١٩٥٨م أثناء عمله بشركة تكساس إنسترومنتس – Texas Isntruments من بناء دائرة متكاملة تماثلية بسيطة على رقيقة من الجيرمانيوم عبارة

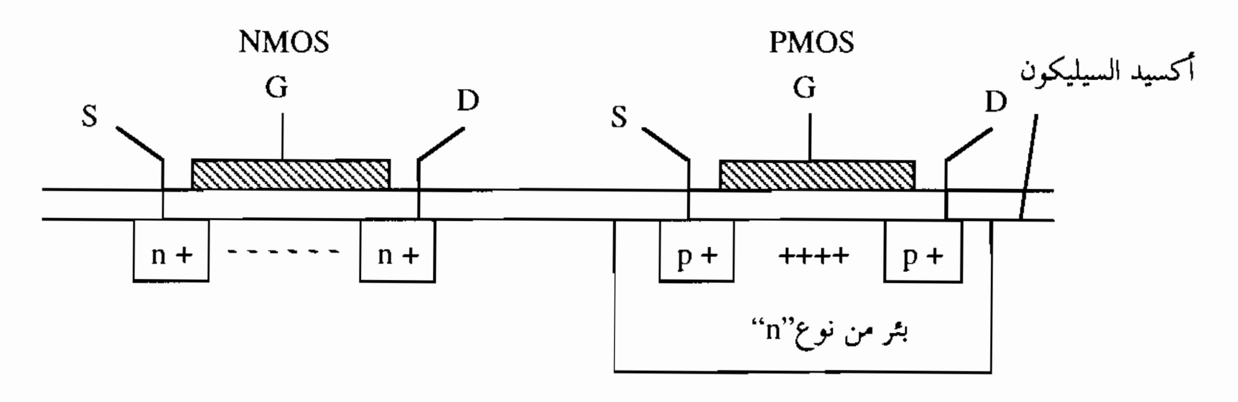
عن مذبذب إزاحة الطور – Phase Shift Oscillator ، وأخرى رقمية بسيطة أيضا على رقيقة من الجيرمانيوم عبارة عن قلاب – Flip Flop . حصل كيلبى على براءة هذا الاختراع فى أواسط الستينيات بعد معركة قانونية طويلة أمام منافسين آخرين من أبرزهم روبرت نويس – Robert Noyce من شركة فيرتشايلد – Fairichild . من حسن الطالع ، أنه فى تلك الأثناء ظهر السيليكون كبديل للجيرمانيوم ، واستعملت التكنولوچيا السطحية كما ذكرنا سابقا . ساعد تجمع ما سبق من محاولات مع ظهور السيليكون واستعمال التكنولوجة السطحية على ازدياد الثقة فى إمكانية نجاح الدوائر المتكاملة ، خاصة إذا لاحظنا أن العمليات التى استعملت فى صناعة الترانزستورات المنفردة بالتكنولوچيا السطحية هى نفسها المستعملة فى الدوائر المتكاملة حتى أيامنا هذه مع الفارق فى عدد الدورات المتكررة ودقة الأبعاد وكثافة المكونات . هذه العمليات هى الأكسدة – Oxidation ، التغطية بطبقة من المقاوم الضوئى – Photo resist ، الطباعة الحجرية الضوئية – Photolihography الحفر – Etching ، الحقن – Doping ، ثم الأكسدة ثانية ، وتكرار ذلك حسب الاحتياج ، وفى النهاية التوصيلات المعدنية – Metalization . بينما تحتاج صناعة الترانزستورات المنفردة بالتكنولوچيا السطحية إلى تكرار الدورة أربع مرات مع استعمال أربعة أقنعة كما ذكرنا سابقا ، فإن الدوائر المتكاملة عادة تحتاج أضعاف ذلك من الدورات والأقنعة .

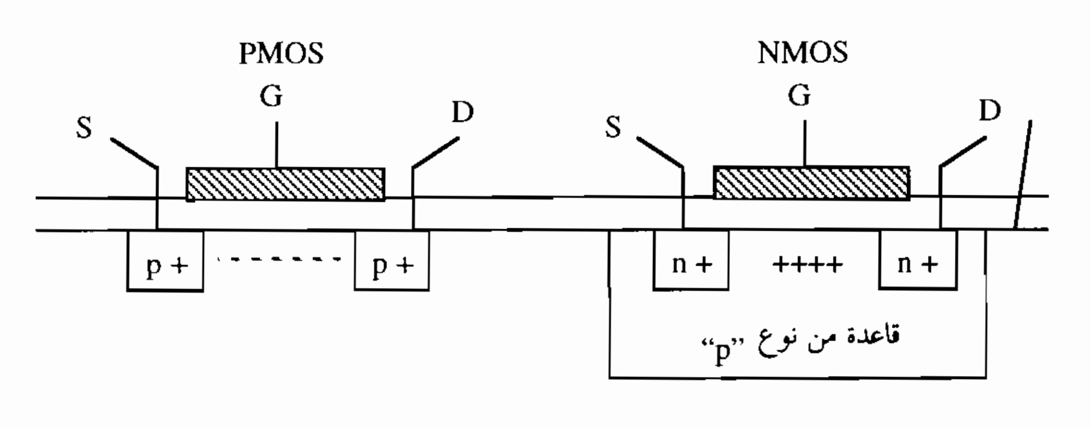
تبدأ صناعة الدوائر المتكاملة برقائق دائرية من بللورات السيليكون سمكها ٢٥٠ ميكرون (ربع ملليمتر) ، وقطرها أكبر ما يمكن حسب ما تسمح به تكنولوچيا استخراج البللورات . كان قطر الرقيقة عام ١٩٦٥م ٢ بوصة ، ووصل حاليًا عام ١٩٩٩ م ١٢ بوصة . يقسم سطح كل رقيقة إلى عدد من المساحات تستوعب كل منها دائرة متكاملة ، وبحد أقصى للمساحة أكبر ما يمكن حسب ما تسمح به درجة نقاء الرقيقة البللورية لتفادى تواجد أماكن معابه قد تتسبب فى فشل بعض الدوائر المتكاملة، وبالتالى كفاءة الإنتاج . كان الحد الأقصى لمساحة الشريحة عام ١٩٦٥م ٢×٢ ملليمتر ، ووصل حاليا عام ١٩٩٩م إلى من ١×١ سم . يلاحظ أنه كلما ازداد قطر الرقيقة ازداد الإنتاج ، وكلما إزداد الحد الأقصى المسموح به لمساحة الشريحة ، أمكن بناء دوائر متكاملة أكبر اتساعا وأكثر شمولا .

يوجد نوعان أساسيان لتكنولوچيا تصنيع الدوائر المتكاملة . النوع الأول يسمى التكنولوچيا الثنائية الإستقطاب – Bipolar Technology ، ويعتمد على الترانزستورات الثنائية الاستقطاب npn و pnp . النوع الثانى يسمى تكنولوچيا معدن – أكسيد – شبه موصل / MOS Technology ، ويعتمد على الترانزستورات الحقلية ذوات القنوات "n" و "p" . فى صناعة الدوائر المتكاملة ، تبنى الترانزستورات فى

أماكنها المحددة بطريقة بناء الترانزستورات المنفردة نفسها المذكورة سابقا . فى الوقت نفسه تبنى المكثفات والمقاومات فى أماكنها المحددة فى الدور المناسب خلال الدورات المتكررة . فمثلا ، يمكن الحصول على مكثف باستعمال وصلة pn منحازة فى الاتجاه العكسى ، أو بمساحتين موصلتين بينهما عازل . كذلك ، يمكن بناء مقاومة بحقن منطقتها المحددة أثناء حقن قاعدة أو باعث الترانزستور الثنائى الإستقطاب npn لنحصل على منطقة من نوع "p" أو "n" لها المقاومة المطلوبة . تتكرر دورات عمليات تصنيع الدوائر المتكاملة حسب مستوى تعقيد وشمول الدائرة . فهناك الدوائر المتكاملة الصغيرة الإتساع – Small Scale Integration (SSI) التى تحتوى على عدد من الترانزستورات فى حدود 10^2 ، والدوائر المتكاملة المتوسطة الإتساع – Medium Scale Integration (MSI) وتحتوى على عدد من الترانزستورات فى حدود 10^3 ، والدوائر المتكاملة الكبيرة الاتساع – Large Scale Integration (LSI) وتحتوى على عدد من الترانزستورات فى حدود 10^4 ، الدوائر المتكاملة الشديدة الاتساع -- Very Large Scale Integration (VLSI) وتحتوى على عدد من الترانزستورات فى حدود 10^5 فأكثر . وقد وصل عدد الترانزستورات على الشريحة الواحدة حاليا أكثر من ١٠ ملايين ترانزستور (10^7) ، ومتوقع الإستمرار فى الزيادة . ساعد على تحقيق هذه الزيادة فى الاتساع فى مساحة الشريحة الذى وصل حاليا إلى أكثر من ١×١ سم ، وفى الوقت نفسه ازدياد كثافة المكونات مع تصغير الحد الأدنى للأبعاد الذى وصل حاليا إلى كسر صغير من الميكرون .

تعتبر تكنولوجيا معدن – أكسيد – شبه موصل MOS هى الأكثر شيوعاً حالياً فى الدوائر المتكاملة الرقمية ، وعلى الأخص تلك التى تحتوى على ترانزستورات حقلية MOST من النوعين ذوى القنوات "n" و "p" على الشريحة نفسها . تسمى هذه بتكنولوجيا MOS المتممة – Complementary MOS (CMOS) . وبما أنها تشمل ترانزستورات NMOS و PMOS على الشريحة نفسها ، فإنها فى التصنيع تبدأ إما بقاعدة من نوع "p" محقونة بأبيار من نوع "n" ، أو بقاعدة من نوع "n" محقونة بأبيار من نوع "p" . تبنى الترانزستورات NMOS فى المناطق من نوع "p" وترانزستورات PMOS فى المناطق من نوع "n" ، كما هو موضح بالشكل (٤-١٢) . كذلك تم حديثاً الدمج بين التكنولوجيا الثنائية الاستقطاب Bipolar والتكنولوجيا المتممة CMOS فى تكنولوجيا جديدة تسمى BICMOS تعطى مرونة ولها مزايا فى تصميم بعض الدوائر والنظم الإلكترونية .


NMOS
PMOS
G
S
D
أكسيد السيليكون
n +
n +
p +
++++
p +
بئر من نوع"n"
قاعدة من نوع "p"


PMOS
NMOS
G
S
D
p +
p +
n +
++++
n +
قاعدة من نوع "p"
بئر من نوع"n"

شكل (٤-١٢)

٥ - التماثلى والرقمى

١/٥ مقدمــة

فى الكهرباء عموماً ، وفى الإلكترونات ضمناً ، نتعامل أساساً مع متغيرين اثنين : أحدهما هو الجهد الكهربي ووحدته الفولت ، والثانى هو التيار الكهربى ووحدته الأمبير. فى الدوائر والنظم الإلكترونية يكفى التعرف على أحد هذين المتغيرين للحصول على الآخر ، لذلك نستطيع القول أنه يكفى عملياً التعامل مع الجهد وحده أو التيار وحده كمتغير أساسى يهمنا متابعة تغيراته مع المكان والزمن . المعتاد أكثر هو التعامل مع الجهد الكهربى ومنه ، إذا أردنا ، يمكن الحصول على بقية المتغيرات مثل التيار والشحنة والطاقة والقدرة عند أى مكان وفى أى زمن .

علم الإلكترونيات بأساسياته وتطبيقاته مسخر أساساً لخدمة الإشارات التي تهم الإنسان من حيث التوليد والإرسال والنقل والاستقبال والانتفاع . تنقسم هذه الإشارات إلى إشارات مسموعة وإشارات مرئية وإشارات أخرى متنوعة . هذه الإشارات ، فى أغلبها ، أصلاً ذات طبيعة غير كهربية وتنبع من مصادر غير كهربية فمثلاً ، الإشارات المسموعة عبارة عن تغيرات فى ضغط الوسط الذى تمر فيه مع المكان والزمن ، سواء كان هذا الوسط هواء أو سائلاً أو جماداً . من أهم مصادر الإشارة السمعية النظام الصوتى فى الإنسان الذى يتكون من الرئتين والأحبال الصوتية وتجاويف الأنف والفم مع حركة اللسان والشفتين ، الإشارات المرئية عبارة عن تغير فى شدة الضوء الصادر من الجسم المرئى مع المكان والزمن . من الإشارات الأخرى المتنوعة ، درجة الحرارة فى فرن، درجة الرطوبة فى منطقة ، مستوى سائل فى وعاء ، معدل مرور مادة معينة من بوابة ، وغير ذلك ، حيث يهمنا فى كل حالة تغير الإشارة مع المكان والزمن . بما أن أصول الإشارة فى معظمها ، كما ذكرنا ، ذوات طبيعة غير كهربية ، وفى الوقت نفسه لا نتعامل فى الإلكترونيات إلا مع الجهد أو التيار كمتغير ، فإنه يلزم أولاً تحويل متغير أى إشارة غير كهربية إلى جهد أو تيار متغير مع المكان والزمن بطريقة تغير المتغير الأصلى نفسه ، وذلك قبل أن يبدأ التعامل معه داخل الدوائر والنظم الإلكترونية . الهياكل التى تقوم بهذا التحويل تسمى محولات – Transducers ، وتسمى الإشارات بعد هذا التحويل بإشارات كهربية . مثلاً ، فى حالة الإشارات السموعة يكون هيكل التحويل هو الميكروفون ، وفى حالة الإشارات المرئية يكون هيكل التحويل هو آلة تصوير الفيديو ، وفى حالة الإشارات الأخري يكون هيكل التحويل عبارة عن حواس – Sensors مناسبة لكل نوع من المتغيرات . كذلك ، بعد التعامل مع هذه الإشارات فى الدوائر والنظم الإلكترونية ، وقبل الانتفاع بها ، قد نضطر إلي إعادتها إلى أصلها

الطبيعي بمحولات عكسية . فى حالة الإشارة المسموعة يكون المحول العكسى هو مكبر الصوت، وفى حالة الإشارة المرئية يكون المحول العكسى هو صمام أو أنبوبة عرض الصورة على الشاشة ، وفى حالة الإشارات الأخرى تكون المحولات عبارة عن هياكل لعرض قيم المتغير مع المكان والزمن على شكل أرقام أو رسومات بيانية أو غير ذلك .

مما تقدم ، نرى أن أى إشارة كهربية ، مهما كان أصلها ، عبارة عن تغير فى الجهد ووحدته الفولت مع المكان والزمن ، وإذا ثبتنا المكان ، فإن الإشارة الكهربية تكون عبارة عن تغير فى الجهد مع الزمن ، هذا التغير مع الزمن يمكن أن يأخذ عديداً من الصور . الأكثر والأعم هو أن يكون المتغير مستمراً مع الزمن ومستمراً فى القيم التى يمكن أن يتخذها ، أى أنه متواجد فى أى لحظة ويمكن أن يتخذ أى قيمة فى أى زمن . هذا النوع من الإشارات يسمى الإشارات المستمرة التماثلية . نبدأ بهذا النوع من الإشارات حيث ، كما سنرى فيما بعد ، سنتمكن عن طريقها من دراسة الصور الأخري للإشارات الكهربية وأنواعها .

هنا ، ودون الدخول فى تفاصيل ، نذكر حقيقة مهمة . ذلك أن أى إشارة كهربية متغيرة مع الزمن يمكن تحليلها إلي مجموعة أو حزمة من الترددات ، أو بمعنى آخر ، يمكن النظر إليها كمتغير مع التردد بدلاً من كونها متغيراً مع الزمن . هذه حقيقة رياضية معروفة بمتواليات وتكامل فوريير – Fourier Series and Integrals . نخرج من هذا بالمفهوم المهم أن أى إشارة كهربية تغطى مدى معيناً من الترددات ، وكلما كان التغير مع الزمن أسرع ، ازداد اتساع المدى الترددى للإشارة فى إتجاه الترددات العالية .

دون الدخول أيضاً فى تفاصيل ، نذكر حقيقة أخرى مهمة ذلك أنه لنقل الإشارة الكهربية ، ليس من الضرورى نقل كل قيمها عند كل اللحظات الزمنية ، بل يكفى أن ننقل منها عينات متقطعة ومنتظمة بشرط أن يكون عدد العينات فى الثانية، ويسمى تردد العينات f_s ، على الأقل مساوياً لضعف أعلي تردد فى الإشارة f_m ، أى أن $f_s > 2 f_m$.

ستكون هذه الحقائق نقط إرتكاز فيما هو قادم لتعرُّف أصناف الإشارات الكهربية بأنواعها التماثلية والرقمية .

٢/٥ الإشارات الكهربية التماثلية

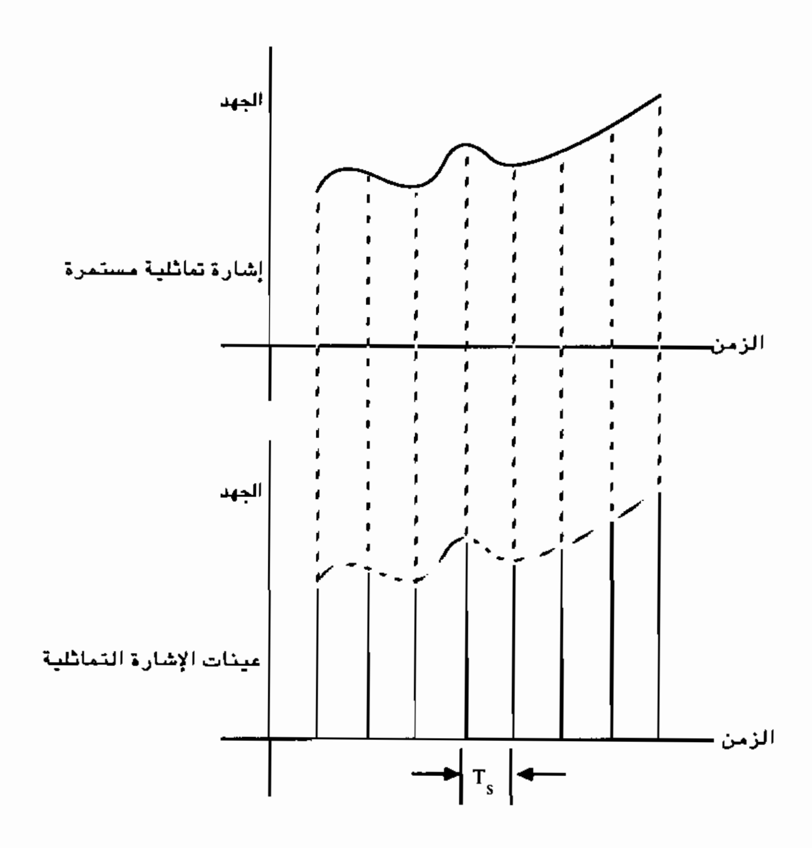
مما سبق ، تكاد تتضح لنا معالم وصفات الإشارات الكهربية ، ولم يبق سوي بلورة وتوضيح هذه المعالم والصفات . فقد ذكرنا أن الإشارات فى غالبيتها ، كما تتواجد فى الطبيعة وتنبع من مصادرها ، ذوات صفات طبيعية غير كهربية . وذكرنا أيضاً أنه يلزم

استعمال محولات – Transducers لتحويل متغيرات تلك الإشارات إلى متغير كهربى. هذا المتغير الكهربى غالباً ما يكون الجهد ووحدته الفولت ، وأحياناً يكون التيار الكهربي ووحدته الأمبير . معنى ذلك أننا نقوم باستبدال المتغيرات غير الكهربية بمتغير كهربى متماثل مع المتغير الأصلى تماماً من حيث التغير مع المكان والزمن ، وإذا ثبتنا المكان يكون التغير فقط مع الزمن . لذلك سميت هذه الإشارات بعد تحويل المتغير غير الكهربى إلى متغير كهربى بالإشارات الكهربية التماثلية . معظم الإشارات الكهربية التماثلية مستمرة التواجد مع الزمن ، رغم تغير قيمها من لحظة لأخرى . توضح نظريات فورير الرياضية أن هذه الإشارات الكهربية التماثلية المستمرة والمتغيرة مع الزمن تغطى مدى ترددياً له حد أقصى f_m . يوجد أيضاً إثبات رياضى ، لا مجال للتعرض له هنا ، إن المعلومات نفسها الخاصة بالإشارات الكهربية التماثلية المستمرة موجودة بالكامل دون أى فقدان أو تقريب ، لو اكتفينا بعينات زمنية متقطعة لهذه الإشارات المستمرة بحيث تكون العينات على فترات زمنية متساوية وعددها فى الثانية "$f_s = 1/T_s$" مساو أو أكبر من $2f_m$. "T_s" هو الزمن بين كل عينة وأخرى ، وسنرى فيما بعد أهمية هذا الزمن فى توليد الإشارات الرقمية . معنى هذا أنه ، من ناحية الزمن ، يوجد نوعان من الإشارات الكهربية التماثلية : النوع الأول مستمر مع الزمن ، والنوع الثانى على شكل عينات متقطعة منتظمة محققة للشرط السابق ذكره . هذا من ناحية التغير مع الزمن ، أما من ناحية قيم الإشارة عند أى زمن للإشارات المستمرة أو قيم العينات للإشارات المتقطعة ، فإنها تأخذ أى قيمة على مدى مستمر دون حدود نظرية لدقة تقييمها، وإن كانت هذه الدقة من الناحية العملية تعتمد فقط على دقة أجهزة القياس . بذلك ، يمكن تصنيف الإشارات الكهربية التماثلية إلى صنفين اثنين كما يلى :

١ – إشارات مستمرة فى الزمن ، مستمرة فى القيم .

٢ – إشارات متقطعة فى الزمن ، مستمرة فى القيم .

يوضح الشكل (٥–١) هذين الصنفين للإشارات الكهربية التماثلية .



شكل (٥-١) : إشارة كهربية تماثلية .

يتم التعامل مع هذه الإشارات الكهربية التماثلية بدوائر ونظم إلكترونية تماثلية . من أهم وحدات تلك الدوائر والنظم ، المكبرات – Amplifiers بأنواعها ، المرشحات – Filters ، المولفات – Tuners ، الخلاطات – Mixers ، المعدلات – Modulators ، الكاشفات – Detectors ، وغير ذلك . أيضاً ، من أهم المواصفات المطلوبة للدوائر والنظم الإلكترونية هي الأمانة فى نقل قيم الإشارات والحفاظ على النسب بينها ، وتقليل التشويه – Distortion والضوضاء – Noise فى تلك الإشارات أثناء التعامل معها .

٣/٥ الأرقام والرموز

نظرية الأرقام ، حالياً ، فرع مهم من أفرع العلوم الرياضية ، وكأى فرع آخر من المعارف البشرية ، مرت نظرية الأرقام بعديد من الممارسات والتطورات التاريخية . ما يهمنا هنا هو الأرقام كوسيلة لتقييم مقادير الكميات الطبيعية بوحدات متفق عليها . من هذا المفهوم ، يمكن اعتبار الأرقام نوعاً من الشفرة من حيث إنها تعتمد على رموز واتفاقات . قديماً ، كانت الرموز والاتفاقات إختيارية ولا تتبع قواعد منطقية ، ولكنها كانت ملزمة بقوة العرف . فمثلاً ، فى لغة قدماء المصريين (الهيروغليفية) ، كانت

رموز الأرقام الأساسية كما هي موضحة فى الشكل رقم (٥-٢) أ ، والاتفاق على تكوين الأرقام من هذه الرموز يتم بالبدء بالقيم الأعلي تليها الأقل مع التكرار حسب الاحتياج . كما يمكن الكتابة فى أى اتجاه، من اليمين إلى اليسار ، أو من اليسار إلى

1	1
10	∩
100	ρ
1.000	[illegible]

شكل (٥-٢) أ

ρρρρρ ∩∩∩∩∩
ρρρρ ∩|||||| = ٩٦٦

شكل (٥-٢) ب

شكل (٥ - ٢) : رموز الأرقام في اللغة المصرية القديمة (الهيروغليفية) .

اليمين ، أو من أعلى إلى أسفل ، وينسق الرقم أثناء التكرار بحرية سواء على مستوى واحد أو مستويين ، فمثلاً الرقم ٩٦٦ يمكن كتابته كما هو موضح فى الشكل (٥-٢) ب ، حيث يكرر الرمز الدال على ١٠٠ تسع مرات . وكل من الرموز الدال على ١٠ والرمز الدال على ١ ست مرات . تستعمل الأرقام الرومانية الرموز الأساسية الآتية :

M	D	C	L	X	V	I
١٠٠٠	٥٠٠	١٠٠	٥٠	١٠	٥	١

والاتفاق على تكوين الأرقام من هذه الرموز هو التكرار مع التقديم للطرح والتأخير للجمع كما يلى :

MC	CM	CX	XC	XI	IX	VI	IV	II
١١٠٠	٩٠٠	١١٠	٩٠	١١	٩	٦	٤	٢

فى النظم الرقمية الحديثة تستعمل إما الرموز الهندية :

١ ٢ ٣ ٤ ٥ ٦ ٧ ٨ ٩

أو الرموز العربية :

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

علماً بأن الصفر لم يعلمه الهنود ، وأضافه العرب على يد الخوارزمى عام ٨٢٠م.
إن تكوين الأرقام من هذه الرموز يتبع قواعد منطقية ثابتة ، باستعمال هذه القواعد المنطقية الثابتة يمكن توليد عديد من النظم الرقمية المختلفة ، وذلك بتغيير معامل مهم يسمي الأساس – Radix (R) . فى النظم الرقمية الحديثة ، لكل رقم إتساع أفقى يتمثل فى عدد الخانات ويسمى سجل – Register ، واتساع رأسى يتمثل فى عدد الوحدات أو الرموز المسموح بها فى كل خانة ، وهذا ما سميناه الأساس – R . كلما إزداد عدد الخانات فى السجل وازداد الأساس ، ازدادت سعة الرقم وقدرته على تقييم كميات كبيرة بدقة أعلى . الاتساع الأفقى للسجل الممثل لعدد الخانات يعتمد على المكان المتاح لهذا السجل ، سواء على الورق فى التعامل اليدوى ، أو من حلقات فى الحاسبات الكهروميكانيكية القديمة ، أو من وحدات إلكترونية فى سجل إلكترونى ، أو فى ذاكرة حاسب إلكترونى . الأساس الذى يمثل عدد الوحدات أو الرموز المسموح بها فى كل خانة يمكن أن يأخذ أى قيمة صحيحة بحد أدنى ٢ . تستعمل كل خانة عدداً من الرموز مساوٍ لقيمة الأساس . تكتب الأرقام فى أى نظام من هذه النظم على صورة "$a_3\ a_2\ a_1\ a_0$ ......" ، حيث a_0 هى الرمز فى الخانة صفر ، a_1 هى الرمز فى الخانة رقم ١ ، a_2 هى الرمز فى الخانة رقم ٢ ، a_3 هى الرمز فى الخانة رقم ٣ ، وهكذا .

تحسب قيمة الرقم بالمعادلة البسيطة الآتية :

$$\text{قيمة العدد} = a_0 + (R \times a_1) + (R^2 \times a_2) + (R^3 \times a_3) + \ldots\ldots \qquad (١-٥)$$

حيث R هى قيمة الأساس .

من أشهر النظم الرقمية المستعملة حالياً ، النظامين العشرى والثنائى . فى النظام العشرى ، قيمة الأساس R = ١٠ ، ويمكن أن تأخذ كل خانة إحدى القيم من صفر إلى تسعة . فى النظام الثنائى ، قيمة الأساس R = ٢ ، ويمكن أن تأخذ كل خانة إحدى القيمتين صفر (0) أو واحد (1) فقط . بتطبيق المعادلة (٥-١) على رقم عشرى وآخر ثنائى ، فإننا نحصل على المثالين التاليين :

عشرى (R = ١٠)

$(a_3\ a_2\ a_1\ a_0) - ١٩٣٠ = ٠ + (٣ \times ١٠) + (٩ \times ١٠^٢) + (١ \times ١٠^٣)$

ثنائى (R = ٢) .

$(a_3\ a_2\ a_1\ a_0) - 1101 = ١ + (\text{صفر} \times ٢) + (١ \times ٢^٢) + (١ \times ٢^٣) = ١٣$

وعلي سبيل المثال ، إذا أردنا كتابة الرقم ١٩٧٧ بنظم رقمية مختلفة ، فإننا نحصل على ما هو موضح بالشكل رقم (٥-٣) .

نظام قدماء المصريين (الهيروغليفى)	ǀǀǀǀ ∩∩∩∩∩ ρρρρρ ǀǀǀ ∩∩∩∩ ρρρρ	لا توجد خانات محددة ولا أساس
نظام الأرقام الرومانية	MCMXCVII	٨ خانات ولا أساس
النظام الرقمى الثنائى	11111001101	١١ خانة - أساس ٢
النظام الثلاثى	2201222	٧ خانات - أساس ٣
النظام العشرى	1997	٤ خانات - أساس ١٠

شكل ٥ - ٣

إذا تخيلنا جدلاً ، أن الأساس R يساوي ما لا نهاية ، واستطعنا اختراع رموز مختلفة عددها ما لا نهاية ، لكفت خانة واحدة لتقييم مقدار أي كمية بأي دقة كما هو الحال في التقييم التماثلى . كذلك ، لو تخلينا عدداً من الخانات يساوي ما لا نهاية، فإن أقل أساس (وهو ٢) يكفي لتقييم مقدار أي كمية بأي دقة كما هو الحال في التقييم التماثلي . واضح أن أياً من التخيلين غير عملى وغير ممكن . ففى العادة قيمة الأساس محدودة ، وعدد الخانات أيضاً محدود . وبالتالى ، فإن قيمة الوحدة فى أقل الخانات وزناً تمثل الحد الأدنى للتمييز (الحد الأقصى للدقة) الممكن الوصول إليه مهما برعنا فى دقة القياس . معنى هذا ، أن تقييم المقادير بالأرقام له حد أقصى من الدقة لا يمكن تحسينه إلا بزيادة الأساس أو عدد الخانات ، وهذه خاصية مهمة يجب استيعابها جيداً بالنسبة للتقييم الرقمى لمقادير الكميات .

يمتاز النظام الرقمى العشرى أنه سهل فى التعامل اليدوى والذهنى ، بينما فى السجلات الكهروميكانيكية أو الإلكترونية ، تحتاج كل خانة إلى خلية لها عشرة أوضاع مستقرة يمثل كل وضع منها أحد الرموز من صفر إلى تسعة . فى السجل

الكهروميكانيكى كان ذلك يتم باستعمال حلقة تدور على محور لكل خانة ، ومطبوع على محيطها الرموز من صفر إلى تسعة . فى السجل الإلكترونى ، قديماً أيام الصمامات ، كان هذا يتم باستعمال صمام غازى يسمى ديكاترون – Dekatron له مصعد واحد فى الوسط ومن حوله عشرة مهابط تقابلها الرموز من صفر إلى تسعة ، ومصممة له الدوائر بحيث يتوهج فقط المهبط الذى هو أمام الرموز المطلوب . مع ظهور الدوائر المتكاملة وتطور الإلكترونات الدقيقة ، أصبح غير متوافق ومن غير المستحب تصميم خلايا لها عشر حالات استقرار . فى الوقت نفسه ، من السهل تصميم خلايا بسيطة لكل منها حالتا استقرار تصلح كخلية فى نظام رقمى ثنائى ، حيث تعتبر إحدى حالتى لاستقرار "0" والأخرى "1" . وهذا ، مع أسباب أخرى خاصة بسهولة التعامل الآلى وأمانة نقل الأرقام على شبكات الاتصالات الكهربية ، أدى إلى استخدام النظام الرقمى الثنائى فى الدوائر والنظم الإلكترونية الرقمية الحديثة .

يمتاز النظام الرقمى الثنائى بعديد من المزايا فى الدوائر والنظم الإلكترونية الرقمية الحديثة . من هذه المزايا أنه ، لأمانة نقل الرقم داخل الأجهزة وعلى شبكات الاتصالات الكهربية ، يلزم فقط التمييز بين "0" و "1" ، أى مثلاً بين «لا شىء» و «شىء» . وهذا يجعل الدوائر والنظم أقل تعقيداً ، ويقلل من مؤثرات الشوشرة والتداخل والضوضاء . كذلك ، من حسن الطالع ، أنه متواجد ومتداول فرع من العلوم الرياضية يسمى جبر بولين – Boolean Algebra مختص بالتعامل مع مثل هذا النظام الرقمى الثنائى فى علاقات منطقية، أدى إلى إندماج المنطق والحساب فى دوائر ونظم إلكترونية موحدة ، مما أفاد كثيراً وخاصة فى دوائر ونظم الحاسبات الإلكترونية وما شابهها .

٤/٥ الإشارات الكهربية الرقمية

من الاسم ، نتوقع أن يكون المقصود بمفهوم الإشارات الرقمية هو تقييم قيمة الإشارة بالأرقام بصرف النظر عن قيمة الأساس R . رغم أن هذا التوقع سليم نظرياً ، إلا أنه من الناحية العملية والواقعية ينحصر أساساً فى القيمة R = ٢ . فالمقصود حالياً بالإشارة الرقمية هو الإشارة التى لا تحتاج إلى تمييز فى القيم أكثر من التمييز بين «لا شيء» و «شيء» أو "0" و "1" . وهذا ، كما رأينا ، ينطبق فقط على نظام الأرقام الثنائية . أما فى النظم الرقمية ذوات الأساس الأعلى ، فإننا نحتاج إلى التمييز بين أكثر من خيارين . ففى النظام الثلاثى نحتاج إلى التمييز بين الثلاث قيم "0 , 1 , 2" ، وفى النظام الرباعى نحتاج إلى التمييز بين الأربع قيم "0 , 1 , 2 , 3" ، وهكذا ، وفى الإشارات التماثلية نحتاج إلى التمييز بين عدد لا نهائى من القيم ؛ أى إن النظام الرقمى يتحرك فى اتجاه التماثلى كلما ازداد الأساس R .

قبل الاستقرار على استعمال النظام الثنائى فى الإشارات الرقمية ، كانت هناك

نظم تشفير قديمة تعتمد أيضاً على التمييز بين «اللاشيء» و «الشيء» . فمثلاً ، فى نظام تشفير مورس MORSE CODE الذى كان يستعمل فى بداية ظهور التلغراف ، كان وجود «شيء» لفترة قصيرة يمثل نقطة ، ووجود «شيء» لفترة طويلة يمثل شرطة، والفاصل بين النقط والشرط هو «اللاشيء» ، بتمثيل كل حرف فى اللغة بمجموعة مميزة من النقط والشرط أمكن إرسال وإستقبال الإشارات . أيضاً ، فى بداية تطور نظم الحاسبات الآلية ، كان من الطبيعى وبحكم العادة استعمال النظام الرقمى العشرى فى تقييم مقادير الإشارات الرقمية . لذلك ، كما ذكرنا سابقاً ، أستعملت الأقراص المرقّمة من صفر إلي تسعة فى نظم الحاسبات الآلية الكهروميكانيكية ، واستعملت الصمامات الإلكترونية الغازية العشرية – Dekatrons فى نظم الحاسبات الآلية الإلكترونية القديمة. بما أن الصمامات الغازية بطيئة بطبيعتها ، أستعلمت دوائر إلكترونية أسرع ذات صفة ثنائية من حيث أن لها حالتى استقرار إحداهما "0" والأخرى "1" . فى الوقت نفسه ، إستمر إستعمال النظام العشرى مع تشفير الرموز من صفر إلى تسعة بالرمزين الثنائيين "0" و "1" . يعتمد هذا التشفير الثنائى للرموز العشرية على وضع وزن لكل خانة فى الشفرة العشرية التى يبلغ عدد خاناتها الثنائية غالباً أربعة . يوضح الجدول (٥-١) بعض نظم تشفير الرموز العشرية .

(جدول ٥-١) : نظم تشفير الرموز العشرية .

Decimal digit	(BCD) 8421	Excess-3	84-2-1	2421	(Biquinary) 5043210
0	0000	0011	0000	0000	0100001
1	0001	0100	0111	0001	0100010
2	0010	0101	0110	0010	0100100
3	0011	0110	0101	0011	0101000
4	0100	0111	0100	0100	0110000
5	0101	1000	1011	1011	[illegible]
6	0110	1001	1010	1100	[illegible]
7	0111	1010	1001	1101	[illegible]
8	1000	1011	1000	1110	[illegible]
9	1001	1100	1111	1111	1010000

مدون بالعامود الأول على اليسار فى هذا الجدول الرموز العشرية من صفر إلى تسعة . يعطى العمود الثانى الشفرة الثنائية المباشرة – Binary Coded Decimal (BCD) ، يعطى العمود الثالث شفرة تسيي زيادة 3 – Excess وهى مستنتجة من الشفرة الثنائية المباشرة بإضافة ٣ = 0011 ، يعطى العمود الرابع شفرة بموازين موجبة وسالبة ، يعطى العمود الخامس شفرة بموازين مختلفة ولكن كلها موجبة ، ويعطى العمود السادس شفرة من سبعة خانات بموازين بين صفر وموجبة . قد يسأل البعض :

ماذا نستفيد من العمود السادس ذى السبع خانات الذى هو لا شك أكثر تكلفة ؟ والإجابة عن هذا التساءل أننا أحيانًا على استعداد لدفع الزيادة فى التكلفة فى مقابل عائد يستحق . لو تأملنا الشفرات العشرة فى هذا العمود الممثلة للرموز من صفر إلى تسعة ، نجد أن كلاً منها يحتوى على عدد اثنين "1" وعدد خمسة "0" مع اختلاف توزيعها بين الخانات . وهذه الخاصية ممكن استثمارها فى تسهيل الاختبار واكتشاف الأعطال ، ويتوافق مع سنة الحياة أن كل شيء بثمن .

على أية حال ، هذه نظم قديمة استعملت فى فترات سابقة . حاليًا ، أثبت النظام الرقمى الثنائى تفوقه ، وأصبح هو المستعمل عالميًا فى الإشارات الرقمية الكهربية ، خاصة للأسباب الآتية :

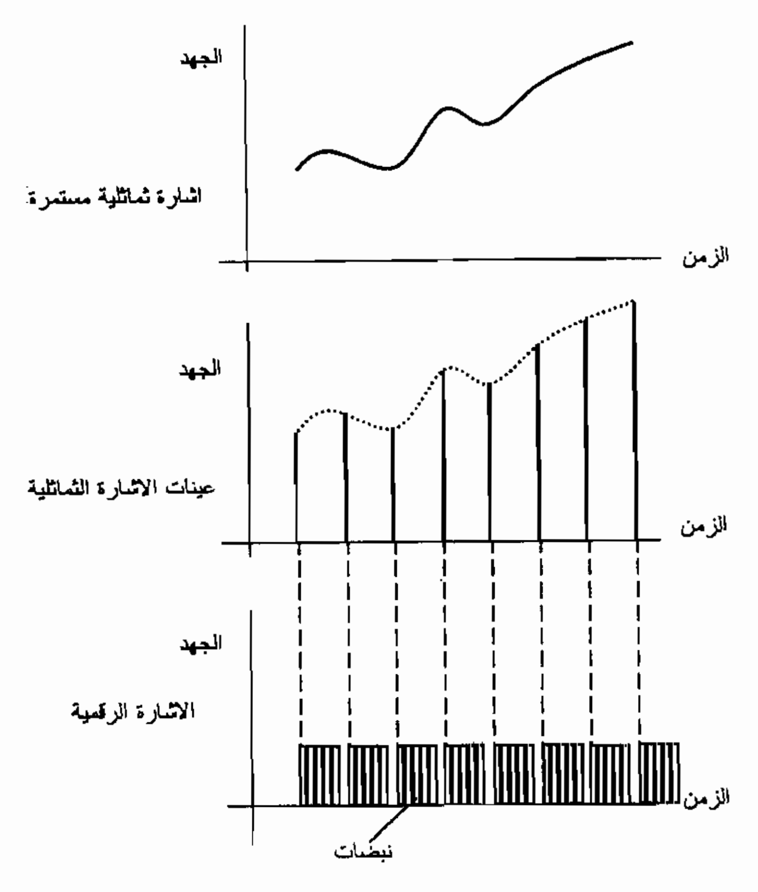
١ - يعتمد على التمييز فقط بين «اللاشيء» و «الشيء» ، أي بين "0" و "1" .

٢ - أنه أحد النظم الرقمية التى تعتمد على قواعد ثابتة ، ويسهل التحويل بينها . لذلك ، يسهل باستعماله تنفيذ العمليات الحسابية مثل الجمع والطرح والضرب والقسمة .

٣ - تنطبق عليه قواعد جبر بولين Boolean Algebra . بذلك يسهل استعماله فى الدوائر المنطقية للتحكم بطرق معينة فى أوضاع معينة بشروط معينة .

٤ - يسهل التحويل منه إلى تماثلى والعكس بدوائر تسمى التحويل من رقمى إلى تماثلى - Digital to Analog Converters (DAC) والتحويل من تماثلى إلى رقمى - Analog to Digital Converters (ADC) .

للحصول على الإشارة الرقمية من الإشارة التماثلية ، فإن نقطة البداية هى تحويل الإشارة التماثلية المستمرة إلى إشارة تماثلية متقطعة فى الزمن بأخذ عينات منتظمة كما ذكرنا سابقًا . يتم تحويل قيمة كل عينة تماثلية إلى قيمة رقمية ثنائية باستخدام دائرة ADC . يتحدد عدد الخانات الثنائية حسب نوع الإشارة ومداها الديناميكى والدقة المطلوبة ، فمثلاً ، جرى العرف على أن يكون عدد الخانات الثنائية للإشارات التليفونية الرقمية ثمانية . وهذا يعطى مدىً ديناميكيًا من صفر إلى ٢٥٦ بدقة ١ إلى ٢٥٦ ، أى حوالى ٠,٤ % ، من أعلى قيمة تماثلية . يجب أن يكون الزمن بين كل عينة تماثلية وأخرى على الأقل كاف لهذا التحويل . بذلك نحصل على الإشارة على شكل تدفق منتظم لأماكن النبضـات ، حيث يمثل تواجد نبضة بأى مكان "1" وعدم تواجدها "0" . يوضح الشكل (٥-٤) خطوات التحويل من إشارة تماثلية إلى إشارة رقمية . هناك أيضًا دوائر إلكترونية لتحويل الإشارات الرقمية إلى إشارات تماثلية عند اللزوم ، وهذه ما أسميناها DAC .



شكل (٥ - ٤) : التحويل من إشارة تماثلية إلي إشارة رقمية .

للإشارات الرقمية مزايا عديدة ، مما جعل استعمالها حالياً هو العادة ، وغير ذلك هو الاستثناء . فهى تعطى قدراً كبيراً من المرونة فى التعامل ، ويمكن تخزينها فى سجلات إلكترونية بسيطة ، أو فى شرائح ذاكرة مثل ذاكرة الحاسب الإلكترونى ، أو فى أقراص محمولة وغير ذلك . كما أنها أقل تأثراً بالشوشرة والتداخل والضوضاء عند نقلها على شبكات الاتصالات الكهربية وشبكات الحاسب مثل شبكة الإنترنت - Internet التى نعرفها جميعاً ويتعامل معها معظمنا . من مميزات الإشارات الرقمية أيضاً، أنها متوافقة مع الأجهزة الطرفية التى هى بطبيعتها رقمية مثل الحاسبات الإلكترونية ، وتلك التى تتحول حالياً إلى رقمية مثل أجهزة السنترالات التليفونية وأجهزة التليفون المتنقل والمحمول وأجهزة التليفزيون الرقمى وغير ذلك .

لتسهيل التعامل مع السيل المتدفق من أماكن النبضات التى تمثل "O" و "I" ، جرت العادة على تسمية كل ثمانية أماكن بايت - Byte ، وكل بايت أو أكثر يمثل معلومة واحدة مترابطة تسمى كلمة - Word ، وكل عدد معين من الكلمات المتوالية

يسمى هيكل – Frame ، وكل عدد معين من الهياكل يسمى مجموعة – Group. عند نقل البيانات على شبكات الإتصالات الكهربية وشبكات الحاسبات ، يتم عادة تجميع وخلط عديد من البيانات من مصادر مختلفة سمعية ومرئية وقياسية وغير ذلك فى تدفق نبضى موحد بتردد نبضى سريع ، وصل حالياً إلى أكثر من ٣ جيجاماك فى الثانية . عند نقاط توزيع قطعية يتم تقسيم هذا التدفق النبضى إلى مجاميع نبضية توجه إلى مسارات محددة ، ثم تقسم هذه المجاميع إلى هياكل عند نقاط قطعية أخرى ، وهكذا ، حتى تصل كل نوعية من البيانات فى النهاية إلى نقاط الاستقبال الخاصة بها.

وما نراه ونعيشه اليوم فى عالم البيانات والمعلومات من توليد وإرسال ونقل واستقبال ليس نهاية المطاف . فما دام هناك قلب ينبض ، فالمسيرة مستمرة ، والله وحده أعلم بما يخبئه المستقبل .

٦ - الدوائر والنظم والإلكترونية

١/٦ مقدمة

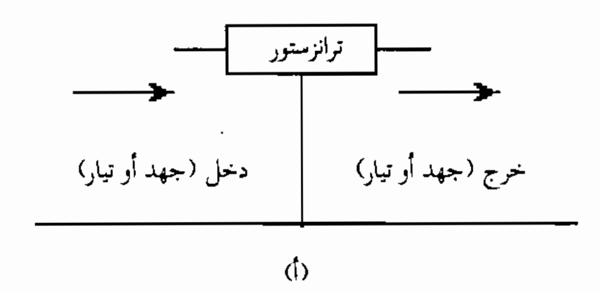
مع تطور الدوائر المتكاملة إلى المستوى الشديد الاتساع – Very Large Scale Integration (VLSI) وما يسمى أحياناً المستوى الفائق الاتساع – Ultra Large Scale Integration (ULSI) ، فإن تعريف الدوائر والنظم الإلكترونية والتمييز بينها أصبح يختلف تماماً عما كان الحال عليه قبل أيام الصمامات الإلكترونية أو الترنزستورات المنفردة . فقد تداخلت المسميات واختلطت المصنفات . كما أوضحنا سابقاً ، فإن الدوائر المتكاملة تتدرج من دوائر صغيرة الاتساع – SSI إلى متوسطة الاتساع – MSI إلى كبيرة الاتساع – LSI إلى شديدة الاتساع – VLSI إلى ما يسمى أحياناً فائقة الاتساع – ULSI ، حسب عدد الترانزستورات فى كل منها وتعقيد الدوائر وشمول الأداء . من هذه الوجهة ، يمكن إعتبار الإتساعين الأول والثانى – SSI,MSI فى عداد الدوائر ، والاتساع الثالث – LSI بين دائرة ووحدة – Module، والاتساع الرابع فما فوقه – VLSI,ULSI نظاماً كاملاً يطلق عليه أحياناً «نظام على شريحة – System on Chip » . من الأمثلة المشهورة للنظم على شرائح المعالج الدقيق – Microprocessor ، والمحكم الدقيق – Microcontroller ، والمعالج الرقمى للإشارات – Digital Signal Processor (DSP) ، وغير ذلك . تتكون الدوائر من مجموعة من النبائط ، وتتكون الوحدة من مجموعة من الدوائر ، ويتكون النظام من مجموعة من الوحدات . والمقصود عادة بالنظام هو مجموعة الوحدات التى تؤدى غرضاً تطبيقياً مفيداً بمواصفات أداء محددة .

تندرج النظم من نظم كبيرة جداً تشمل العالم بأجمعه كشبكة الإنترنيت – Internet ومحطات الإرسال الإذاعي والتليفزيون العالمية ، إلى نظم محلية كشبكة التليفون المحلية والإرسال الإذاعى والتليفزيون المحلى ، إلى نظم محدودة كشبكات الحاسبات المحلية – Local Area Networks (LANs) إلى أجهزة متعددة الأغراض، كسنترال تليفونى مثلاً ، مكون من مجموعة من الكارتات المطبوعة – Printed Circuit Boards (PCBs) يحتوى كل منها على مجموعة من الدوائر المتكاملة ومتواجدة داخل كابينة أو أكثر ، إلى أجهزة محدودة كأجهزة التليفون والراديو والتليفزيون والحاسب الشخصى ، إلى نظام على شريحة دائرة متكاملة شديدة أو فائقة الاتساع . عندما يكون النظام كبيراً جداً ، يتم عادة تقسيمه إلي مجموعة من النظم

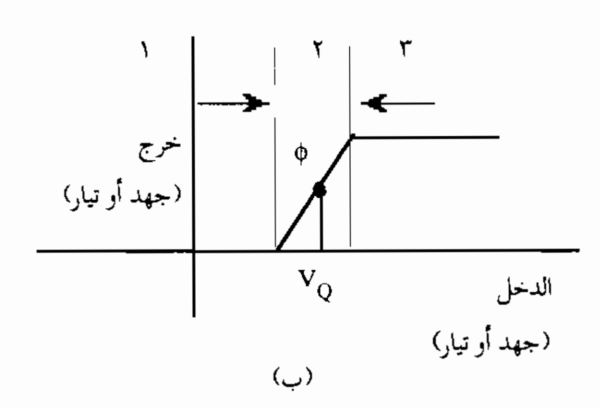
الأصغر تسمي نظماً تحتية – Subsystems ، وذلك كى يسهل التعامل معها فى التحليل والتصميم والاختبار والصيانة .

تنقسم الدوائر والنظم الإلكترونية إلى دوائر ونظم تماثلية تتعامل مع الإشارات التماثلية ، ودوائر ونظم رقمية تتعامل مع الإشارات الرقمية . كما توجد أيضاً دوائر مواجهة بين التماثلى والرقمى مثل ADC , DAC السابق ذكرها ، وكذلك دوائر المقارنة – Comparators ، ودوائر القطع والربط التماثلية – Analog Switches التى تتحكم فيها إشارات رقمية .

الدوائر الإلكترونية ، سواء منها التماثلى أو الرقمى، تستعمل النبائط الفعالة (الترانزستور) نفسها بالإضافة أحياناً إلي بعض المكونات غير الفعالة مثل المقاومات والمكثفات. دون الإخلال بالعموميات، فإنه يمكن تقريب خواص دائرة الترانزستور كما هو موضح بالشكل (٦-١) . الشكل (٦-١-أ)يوضح نموذج الدائرة مـن حيث إن له



(أ)



(ب)

شكل (٦-١)

دخلاً وخرجاً يحدد كل منهما بالجهد أو التيار . الشكل (٦-١-ب) يمثل نموذجاً للعلاقة بين الدخل والخرج ، حيث يلاحظ أنه ينقسم إلى ثلاثة مناطق ١ ، ٢ ، ٣ .

المنطقة ١ تمثل القطع حيث لا يوجد خرج ويعرف بالمستوى "0" . المنطقة ٢ تمثل الحالة الفعالة للترانزستور ، حيث يتغير الخرج تدريجياً مع الدخل بطريقة خطية تناسبية – Linear Relation . المنطقة ٣ تمثل التشبع ، حيث يستقر الخرج عند قيمة ثابتة مهما ازداد الدخل ويعرف بالمستوى "1" . فى الدوائر التماثلية ، ينحصر عمل الدائرة فى المنطقة ٢ ، وفى أغلب الأحيان لا يسمح لها بتجاوزها إلى أى من المنطقتين ١ أو ٣ ، حيث يتسبب أى تجاوز فى حدوث تشويه فى إشارة الخرج التماثلية. لضمان ذلك يلزم توصيل جهد انحياز مستمر V_Q على الدخل فى وسط المنطقة ٢ والسماح لإشارة الدخل التماثلية بالتغير يمين ويسار هذه النقطة V_Q فقط بالقدر الذى يحفظها داخل المنطقة ٢ ، مع ملاحظة أن المدى الديناميكى للإشارة التماثلية يزداد كلما ازداد عرض وارتفاع المنطقة ٢ . فى الدوائر الرقمية ، تنحصر الإشارة الرقمية إما فى المنطقة ١ ، وتمثل الخرج "0" ، أو فى المنطقة ٣ وتمثل الخرج "1" . الانتقال من "0" إلى "1" وبالعكس مروراً بالمنطقة ٢ يجب أن يتم سريعاً . فى الواقع سرعة هذا الانتقال هى التى تحدد سرعة الدوائر والنظم الإلكترونية الرقمية . واضح أنه كلما كان عرض المنطقة ٢ أقل كانت سرعة الانتقال أعلى ، وعادة تصمم الدوائر الرقمية بحيث يكون هذا العرض صفر تقريباً .

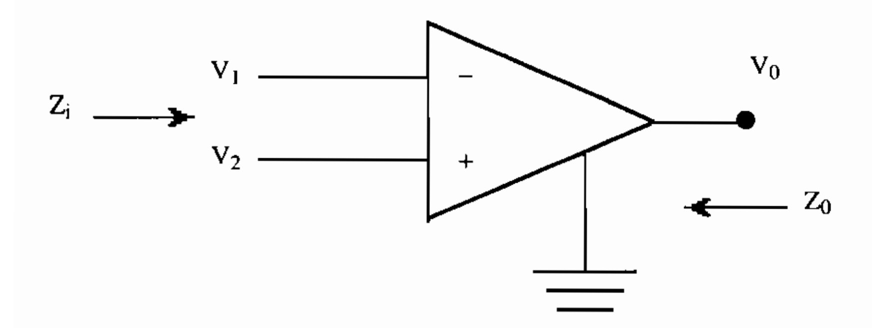
مع الإلكترونيات الدقيقة والدوائر المتكاملة ، يستحيل تصميم النظم يدوياً . يتم التصميم عادة باستعمال الحاسب الإلكترونى وآليات خلفية متداولة خصيصاً لهذه الأغراض فيما يسمي بآليات التصميم بمساعدة الحاسب – Computer Aided Design Tools (CAD Tools) ، متدرجة من آليات صغيرة متواضعة إلي آليات كبيرة متقدمة حسب حجم وتعقيد النظم المراد تصميمها . تستعمل هذه الآليات فى التصميم ابتداء من أعلى مستوى وهو المواصفات المطلوبة ، إلى أدنى مستوى وهو ترتيب أوضاع الترانزستورات – Layout على شريحة السيليكون ، والربط بينها – Routing . يدخل التصميم بعد ذلك إلى مرحلة التنفيذ إبتداء من تجهيز الأقنعة – Masks إلى صناعة الدوائر المتكاملة كما ذكرنا سابقاً . تستعمل طرق التصميم نفسها بمساعدة الحاسب الإلكترونى فى حالة نظام على كارت دائرة مطبوعة – PCB ، أو مجموعة من هذه الكارتات ، وذلك باستخدام آليات خلفية مخصصة لذلك . فى النظم التماثلية أو الرقمية ، يوجد مجموعة من الدوائر أو الوحدات الكثيرة الاستعمال . عادة ، تختزن تصميمات مثالية لهذه الدوائر والوحدات على شكل بيانات فى خلفيات تسمى مكتبات – Libraries . بذلك ، لن يكون هناك ما يدعو إلى تكرار تصميمها كلما احتجنا إليها ، بل تستدعى التصميمات المطلوبة من المكتبات التى هى عادة متوفرة من مصادر عديدة. عند الاحتياج إلى أى من هذه الدوائر أو الوحدات فى تصميم نظام، يتم استدعاؤها من المكتبة المناسبة وضمها إلى البرنامج الرئيسى الخاص بتصميم النظام .

كلما ازداد تعقيد النظام ، سواء على شريحة أو كارت أو مجموعة كارتات ، ازدادت صعوبة إختباره وصيانته وإصلاحه . كما يستحيل القيام بذلك يدوياً . لذلك ، ازداد الإهتمام بتسهيل اختبار هذه النظم آلياً . وأصبحت طرق الاختبار الآلي للنظم الإلكترونية الحديثة فرعاً علمياً بذاته له أبحاثه ومؤلفاته وتطبيقاته . حالياً ، يؤخذ الاختبار فى الحسبان مبكراً مع بداية التصميم ، وغالباً ما تضاف دوائر خاصة لتسهيل الاختبارات واكتشاف الأعطال سواء أثناء الإنتاج أو عند التشغيل .

٢/٦ الدوائر التماثلية

كما ذكرنا فى مقدمة هذا الباب ، تستعمل الدوائر التماثلية الترانزستور فى منطقته الفعالة التى يتغير فيها الخرج مع الدخل بتناسب خطى – Linear . وهذا يستلزم تدبير جهد انحياز مناسب لوضع الترانزستور فى منتصف هذه المنطقة . يسمح تواجد الإشارة التماثلية بالتحرك حول نقطة المنتصف هذه فى حدود المنطقة الفعالة وعدم تخطيها إلى أى من منطقتى القطع أو التشبع . يوجد العديد من الدوائر التماثلية من أهمها دوائر توليد الإشارات الجيبية وتسمى مذبذبات – Oscillators عند ترددات وقيم مختلفة والمكبرات – Amplifiers بأنواعها من مكبرات سمعية لتغطية مدى التردد السمعى من ٢٠ هرتز إلى ٢٠ كيلو هرتز ، ومكبرات الفيديو لتغطية مدى تردد إشارات الفيديو من ٢٥ هرتز إلى ٥ ميجاهرتز ، ومكبرات الراديو المولفة التى تغطى حزمة معينة فى مدى تردد الراديو حتى بداية الترددات الميكرووية ، ومكبرات التردد البينى – IF ، وغير ذلك . يوجد أيضاً مجموعة أخرى من الدوائر تدخل فى نطاق الدوائر التماثلية، وتتميز بأن عملها يعتمد على علاقة غير خطية – Nonlinear بين الدخل والخرج. من هذه الدوائر ، دوائر الخلط – Mixers التى تستعمل فى أجهزة الاستقبال اللاسلكية وتنقل المدى الترددى للإشارة التماثلية من حزمة ترددية عند أى موقع على الطيف الكهرومغناطيسى إلى حزمة ترددية عند موقع آخر حول تردد بينى Intermediate Frequency (IF) - f_I ، ودوائر التعديل – Modulators التى تستعمل فى دوائر الإرسال اللاسلكية وتنقل المدى الترددى للإشارات التماثلية إلى حزمة ترددية عند أى موقع على الطيف الكهرومغناطيسى حسب تردد الموجه الحاملة Carrier Frequency (f_c) ، ودوائر الكشف – Detectors التى تستعمل فى أجهزة الاستقبال وتسترجع الحزمة الترددية المعدلة ثانية إلى المدى الترددى الأصلى للإشارة التماثلية ، ودوائر التحديد – Limiters التى تحدد القيم العليا للإشارات التماثلية عند مستويات معينة ، وغير ذلك .

هناك نوع من المكبرات له صفات وأهمية خاصة ، يطلق عليه مكبر العمليات – Operational Amplifiers . يمتاز هذا النوع من المكبرات بمواصفات خاصة تجعله محوراً لعديد من التطبيقات المهمة فى النظم التماثلية . يوضح الشكل (٦–٢) الرسم الرمزي لهذا المكبر ، ومن مواصفاته المثلى ما يلى :



شكل (٦-٢)

١ – الخـــرج V_0 يتناسب مع الفرق بين دخلين V_2 , V_1 ، ولا يتأثر بمتوسط قيمتهما . $V_0 = A (V_2 - V_1)$.

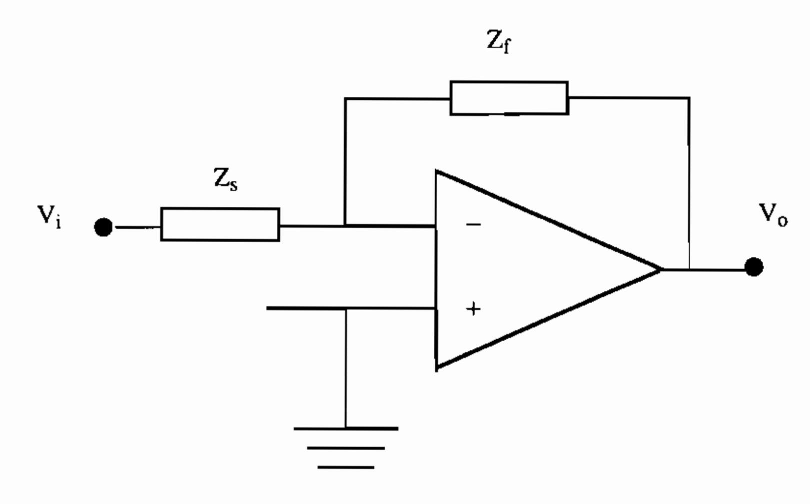
٢ – يغطى المدى الترددى من صفر – DC إلى تردد مرتفع حسب الإحتياج .

٣ – قيمة التكبير – A عند بداية المدى الترددى يساوى ما لا نهاية .

٤ – قيمة ممانعة الدخل – Z_i تساوى مالا نهاية .

٥ – قيمة ممانعة الخرج – Z_0 تساوى صفراً .

هذه هى المواصفات المثلى ، ولكن الواقع دائماً يختلف ، وكلما اقتربت المواصفات الواقعية من المثلى كان المكبر أفضل . باستعمال هذا المكبر مع تغذية خلفية كما هو موضح بالشكل (٦-٣) فإنه يمكن الحصول على دوائر تماثلية مفيدة تعتمد خواصها على قيم ونوعية الممانعات Z_f , Z_s . فعلى سبيل المثال :



$$A = V_o / V_i = Z_f / Z_s$$

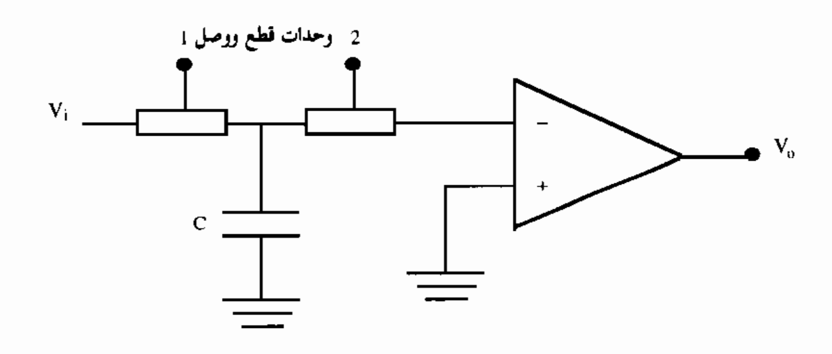
شكل (٦-٣)

١ - إذا كانت كل من Z_f , Z_s مقاومة ، فإننا نحصل على مكبر عادى بقيم للتكبير حسب الاحتياج .

٢ - إذا كانت Z_f مقاومة و Z_s مكثف ، فإننا نحصل على دائرة تفاضلية ، حيث يكون الخرج تفاضل الدخل .

٣ - إذا كانت Z_f مكثف و Z_s مقاومة ، فإننا نحصل على دائرة تكاملية ، حيث يكون الخرج تكامل الدخل .

أيضاً ، باستعمال هذه المكبرات ، يمكن تصميم دوائر تماثلية أخرى مهمة تعرف بالدوائر التماثلية الفعالة ، من أمثلة هذه الدوائر مرشحات الترددات بأنواعها الثلاثة ، السماح المنخفض - Low Pass (LP) ، السماح الحزمى - Band Pass (BP) ، السماح المرتفع - High Pass (LP) . وكذلك دوائر أخرى مفيدة مثل الدوائر الدوارة - Gyration Circuits ودوائر تحويل التيار - Current Conveyors ، وغير ذلك مما لا مجال هنا للدخول فى تفاصيله . أيضاً ، يستعمل مكبر العمليات فى نوع آخر مهم من الدوائر التماثلية تسمى دوائر قطع ووصل المكثفات - Switched Capacitor Circuits . يوضح الشكل (٦-٤) عينة مبسطة لهذا النوع من الدوائر .



شكل (٦-٤)

بقطع ووصل مكثفات فى الدائرة فى أماكن مختارة بتردد وتوزيع معين يمكن تصميم عديد من الدوائر المفيدة بما فى ذلك المرشحات بأنواعها . تمتاز هذه الدوائر بأنها من أكثر الدوائر التماثلية مواءمة مع تكنولوچيا الدوائر المتكاملة من حيث سهولة التنفيذ وزيادة الكثافة علي الشريحة .

٣/٦ النظم التماثلية

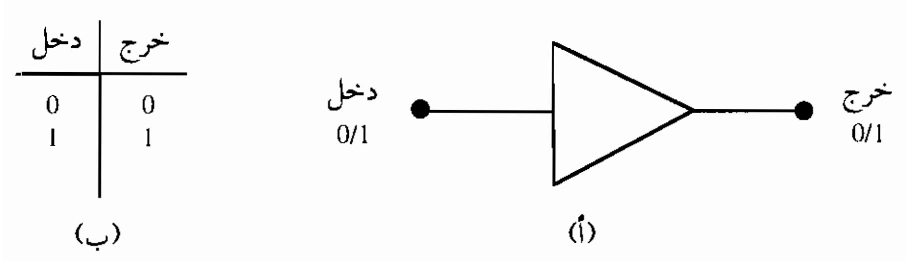
تتكون النظم التماثليـــة من دوائر تماثلية ، وتتعامل مع إشارات تماثلية . فى زمــن الصمامـــات الإلكـــترونية وبدايـــة الترانزستورات المنفردة ، كانت معظم النظم

الإلكترونية تماثلية . رغم الانكماش الحالى للنظم التماثلية فى صالح النظم الرقمية مع التطورات فى الدوائر المتكاملة والحاسبات ، فإن تواجدها سيظل حتمياً فى تطبيقات عديدة إما تماثلية بالكامل أو خليط بين التماثلى والرقمى فيما يعرف بالنظم المختلطة .

من النظم التى مازالت تماثلية حتى يومنا هذا ، نظم الإرسال والاستقبال الإذاعى والتليفزيون ، ومن النظم التى هى خليط بين تماثلية ورقمى نظم الشبكات والخدمات التليفونية . على أية حال ، فإن التحول من نظم تماثلية إلى نظم رقمية مستمر . فعلى سبيل المثال ، هناك جهود جدية تبذل حالياً لتحويل الإرسال والاستقبال التليفزيونى إلى نظام رقمى فيما يعرف بالتليفزيون العالى الجودة High Difinition TV – (HDTV) . وقد وصلت هذه الجهود إلى مراحل متقدمة ينتظر تطبيقها فى وقت قريب .

٤/٦ الدوائر الرقمية

كما ذكرنا فى مقدمة هذا الباب ، تستعمل الدوائر الرقمية الترانزستور فى حالتى القطع والتشبع ، بحيث إذا مثلت إحدى هذين الحالتين "0" تمثل الثانية "1" . وعند الانتقال من حالة إلى أخرى ، مروراً بالمنطقة الفعالة ، فإن هذا يجب أن يحدث بأقصى سرعة ، حيث إن سرعة هذا الانتقال هى التى تحدد سرعة الدوائر والنظم الرقمية عند التطبيق العملى . يمكن تمثيل الدوائر والنظم الرقمية على عدة مستويات ، ابتداء من مستوى دوائر الترانزستور عند القاع ، وهو المستوى الذى ينقل على السيليكون عند التصنيع ، إلى مستوى مواصفات النظام عند القمة ، مروراً بمستوي البوابات ، ثم مستوى السجلات ، ثم مستوى الوحدات ، ثم مستوى النظم التحتية ، إلى مستوى النظام الكامل . كما أن المكبر يمثل الوحدة الأساسية التى تبنى منها الدوائر التماثلية فإن البوابة – Gate تمثل الوحدة الأساسية التى تبنى منها الدوائر الرقمية . هنا يجب أن نتذكر أن الدوائر والنظم الإلكترونية الرقمية تتعامل مع قيمتين فقط فى تمثيل الإشارة القيمة "0" والقيمة "1" ، أى أن أى نقطة أو خط توصيل فى الدائرة الرقمية أو النظام الرقمى تأخذ فقط إما القيمة "0" أو القيمة "1" ، مع الانتقال بين هاتين القيمتين حسب ديناميكية الدائرة الرقمية أو النظام الرقمى . أبسط أنواع البوابات هى بوابة الحاجز – Buffer ، وهذه لها مدخل واحد ومخرج واحد ، والخرج هو الدخل نفسه. يرمز لبوابة الحاجز بالرمز البيانى الموضح بالشكل (٦–٥–أ) وتتحدد

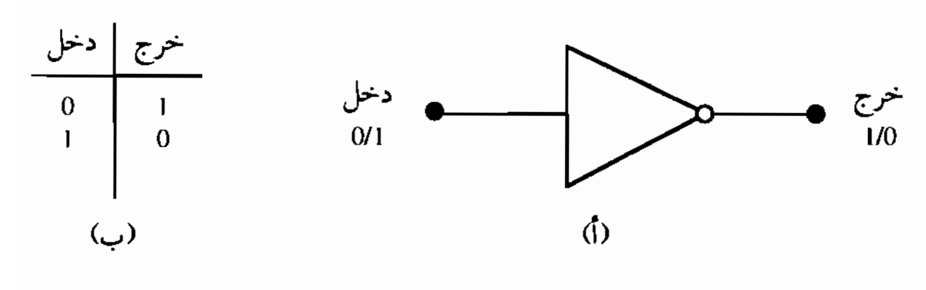


خرج	دخل
0	0
1	1

(ب)

شكل (٦–٥)

العلاقة بين الخرج والدخل بما يعرف بجدول الحقيقة – Truth Table الموضحة بالشكل (٦–٥–ب) . قد يسأل البعض ، ما فائدة هذه البوابة إذا كان الخرج هو الدخل نفسه ؟ في الواقع ، لهذه البوابة فائدة كبيرة ، ومن أجلها تستعمل كثيراً ، ذلك أنه ، رغم أن الخرج هو الدخل نفسه ، إلا أنها تحجز البيئة ناحية الخرج عن البيئة ناحية الدخل ، بمعني أن أى مؤثر غير مرغوب فى ناحية الخرج لا ينتقل تأثيره إلى ناحية الدخل . فمثلاً ، إذا تواجد فى ناحية الخرج حمل نازف كمكثف كبير ، فإن ناحية الدخل. لا تشعر بهذا الحمل . بوابة أخري على المستوى نفسه من البساطة ، ولها أيضاً مدخل واحد ومخرج واحد ، هى بوابة العاكس – Inverter . يرمز لهذه البوابة بالرمز البيانى الموضح بالشكل (٦–٦–أ) . بالإضافة إلى حجز الخرج عن



دخل	خرج
0	1
1	0

(ب)

شكل (٦–٦)

الدخل كالبوابة السابقة ، فإن هذه البوابة تعكس الدخل ، بمعنى أن الخرج عكس الدخل كما هو موضح بجدول الحقيقة فى الشكل (٦–٦–ب) . يلاحظ فى رمز بوابة العاكس وجود الدائرة الصغيرة عند نقطة الخرج . هذه الدائرة الصغيرة تستعمل كثيراً فى الدوائر الرقمية كى تمثل الانعكاس ، بمعنى أن ما بعدها عكس ما قبلها . وبمفهوم أعم ، إذا كان ما قبلها x فإن ما بعدها يكون $\bar{x}$ ، حيث تواجد العلامة «–» على المتغير يمثل عكس هذا المتغير .

معظم البوابات الأخرى لها أكبر من دخل ، على الأقل اثنين ، وفى الغالب لها خرج واحد . يوضح الشكل (٦–٧) مجموعة البوابات المنطقية الأساسية التى منها يمكن تجميع أى دائرة رقمية من أى نوع ولأى غرض . يوضح هذا الشكل الرمز الممثل لكل بوابة ومعادلة بولين وجدول الحقيقة الخاصين بكل منها ، وهذه البوابات هي :

١ – البوابة الجمعية – AND Gate ، لها مدخلان أو أكثر وخرج واحد . يكون الخرج "1" عندما تكون كل المداخل "1" .

إسم البوابة Name	الرمز البيانى Graphic Symbol	معادلة بولين Algebriac Function	جدول الحقيقة Truth Table
جماعى – AND	x, y — F	$F = xy$	x y | F 0 0 | 0 0 1 | 0 1 0 | 0 1 1 | 1
اختيارى – OR	x, y — F	$F = x + y$	x y | F 0 0 | 0 0 1 | 1 1 0 | 1 1 1 | 1
حاجز – Buffer	x — F	$F = x$	x | F 0 | 0 1 | 1
عاكس – Inverter	x — F	$F = \bar{x}$	x | F 0 | 1 1 | 0
لاجماعى – NAND	x, y — F	$F = (\overline{xy})$	x y | F 0 0 | 1 0 1 | 1 1 0 | 1 1 1 | 0
لااختيارى – NOR	x, y — F	$F = (\overline{x + y})$	x y | F 0 0 | 1 0 1 | 0 1 0 | 0 1 1 | 0
Exlusive-OR (XOR) – اختيارى مقصور	x, y — F	$F = x\bar{y} + \bar{x}y$ $= x \oplus y$	x y | F 0 0 | 0 0 1 | 1 1 0 | 1 1 1 | 0
Exlusive NOR or (Equivalence) – لااختيارى مقصور	x, y — F	$F = x\bar{y} + x\bar{y}$ $= x \odot y$	x y | F 0 0 | 1 0 1 | 0 1 0 | 0 1 1 | 1

شكل (٦–٧) : مجموعة البوابات المنطقية الأساسية .

٢ - البوابة الاختيارية - OR Gate ، لها مدخلان أو أكثر وخرج واحد . يكون الخرج "1" عندما يكون أى من المداخل أو جميعهم "1" .

٣ - بوابة الحاجز - Buffer ، لها دخل واحد وخرج واحد. الخرج هو الدخل نفسه.

٤ - بوابة العاكس - Inverter لها دخل واحد وخرج واحد . الخرج عكس الدخل .

٥ - البوابة اللاجمعية - NAND Gate ، عكس البوابة رقم ١ .

٦ - البوابة اللااختيارية - NOR Gate ، عكس البوابة رقم ٢ .

٧ - بوابة اختيارية مقصورة - Exclusive OR (XOR) ، لها مدخلان وخرج واحد. الخرج يكون "1" فقط عندما يكون أحد المدخلين "1" وليس كليهما .

٨ - بوابة لا اختيارية مقصورة - Exclusive NOR (XNOR) ، وأحياناً تسمي بوابة التكافؤ ، لها مدخلان وخرج واحد . يكون الخرج "1" فقط عندما يكون المدخلان متكافئين ، أى كليهما "0" أو كليهما "1" .

كما قلنا سابقاً ، فإن أى دائرة رقمية ، مهما كان نوعها أو الغرض منها ، يمكن تجميعها من هذه البوابات .

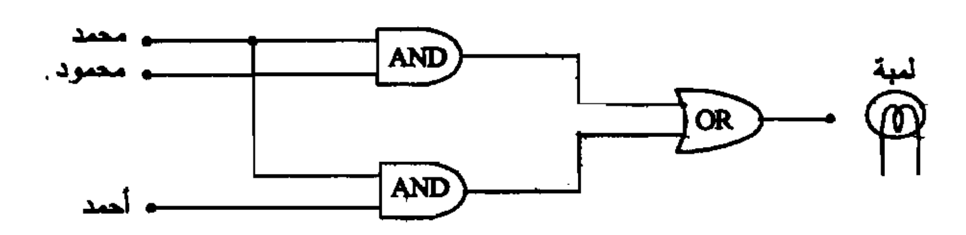
بخلاف الوضع فى حالة الدوائر التماثلية ، يوجد نوعان مميزان للدوائر الرقمية ، النوع الأول يسمى الدوائر الرقمية التجمعية - Combinational Digital Circuits ، وفيها يتحدد الخرج حسب قيم الدخول المتواجدة . النوع الثانى يسمى الدوائر الرقمية التعاقبية - Sequential Digital Circuits ، وفيها يتحدد الخرج حسب قيم الدخول المتواجدة بالإضافة إلى قيم خرج سابقة ، وهذا يعنى إما تواجد تغذية خلفية - Feedback أو تخزين - Storage . فى حالة الدوائر التعاقبية ، يلزم الانتباه إلي عامل الزمن كى نضمن صحة تزامن المداخل المختلفة قبل اعتماد الخرج . هذا يستدعى إما تدبير إشارات تزامن - Clock Signals لحفظ التزامن - Synchronization أو الاعتماد على بروتوكولات تزامنية ذاتية - Self Timing دون الحاجة إلي إشارات تزامن - Asynchronous . يحتاج التزامن الذاتى إلى دوائر إضافية لتأمين فاعليته . لزيادة الإيضاح ، نستعرض ثلاثة أمثلة . إثنان لدوائر رقمية تجمعية ، إحداهما منطقية والأخرى حسابية ، والمثال الثالث لدائرة رقمية تعاقبية .

مثال ١ - دائرة رقمية تجمعية منطقية .

ثلاثة شبان ، محمد ومحمود وأحمد ، يمثل تواجد أى منهم "1" ، وعدم تواجده "0" . ولمبة تضيء عند المستوى "1" وتنطفيء عند المستوى "0" .

المطلوب : أن تضئ اللمبة إذا تواجد محمد مع محمود أو محمد مع أحمد ، وتنطفئ فيما عدا ذلك . أى تنطفىء إذا تواجد أى شاب بمفرده أو تواجد محمود مع أحمد .

يمكن تنفيذ ذلك بالدائرة المنطقية الموضحة بالشكل (٦-٨) والمكونة من بوابتين جمعيتين وبوابة واحدة اختيارية . بمراجعة هذا الشكل يتضح أن اللمبة تضئ فقط إذا تواجد محمد مع محمود أو محمد مع أحمد كما هو مطلوب .



شكل (٦-٨)

مثال ٢ - دائرة رقمية تجمعية حسابية :

لجمع ٢ ماك - bits ، x , y ، من السهل متابعة أن الجمع S والباقي C يتبعان جدول الحقيقة فى الشكل ٦-٩-ب) . كما أنه من السهل متابعة تنفيذ هذا الجدول بالدائرة الحسابية الموضحة فى الشكل (٦-٩-أ) .

x	y	s	c
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

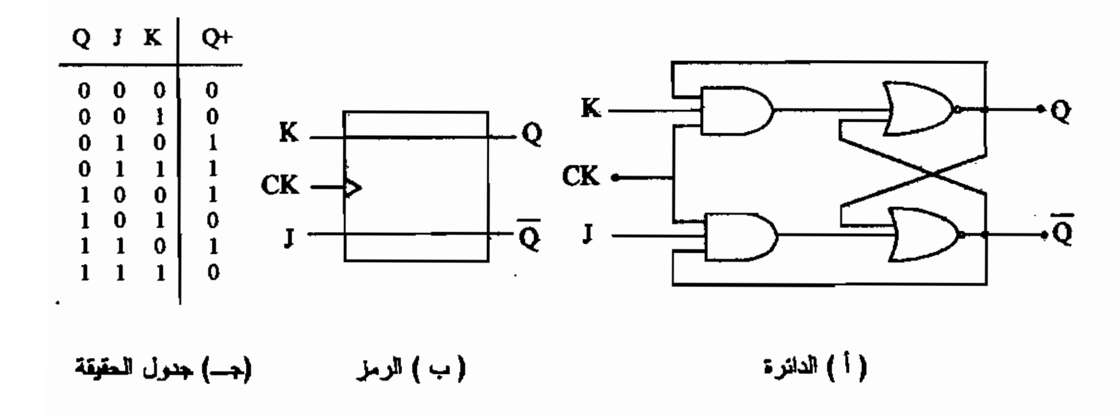
XOR
AND

(أ) (ب)

شكل (٦-٩) : دائرة حسابية .

مثال ٣ – دائرة رقمية تعاقبية :

أبسط مثال لهذه الدائرة هو دائرة النطاط – Flip Flop . ومن أشهرها نطاط JKكما هو موضح بالشكل (٦–١٠–أ) ورمزه بالشكل (٦–١٠–ب) وجدول الحقيقة بالشكل (٦–١٠–جـ) .



Q	J	K	Q+
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

شكل (٦–١٠) : دائرة رقمية تعاقبية .

الأمثلة السابقة ، رغم بساطتها ، إلا أنها تعطى وتوضح الفكر المتبع لتنفيذ الدوائر الرقمية التجمعية والتعاقبية الأكثر تعقيداً .

بالإضافة إلي ما سبق ، يوجد فرع آخر من الدوائر الرقمية ذات طابع خاص ، وتستعمل أساساً فى تخزين الإشارات والمعلومات . يعتبر تخزين الإشارات والمعلومات احتياجاً أساسيًا في النظم الرقمية عامة والحاسبات الإلكترونية بوجه خاص . أوعية التخزين عديدة ، منها المتنقل والمحمول كالشرائط والأقراص المغناطيسية ، ومنها المثبت فى جهاز ويسمى ذاكرة – Memory . يمكن تنفيذ الذاكرة بعديد من التكنولوچيات. ففى بداية ظهور الحاسبات الإلكترونية كانت تستعمل أسطوانة مغناطيسية – Magnetic Drum ، ثم تطورت هذه إلى قوالب مغناطيسية Magnetic Cores ، ثم تطورت هذه إلى ذاكرة أشباه الموصلات Semiconductor Memory . ما يهمنا هنا هو التكنولوجيا الأخيرة ، أى ذاكرة أشباه الموصلات .

هناك نوعان أساسيان لذاكرة أشباه الموصلات . ذاكرة دائمة تحتفظ بما فيها من مخزون رغم انقطاع الطاقة الكهربية . وذاكرة متبخرة تفقد ما فيها من مخزون عند انقطاع الطاقة الكهربية . من أمثلة الذاكرة الدائمة الذاكرة التى يمكن أن تقرأ فقط – Read Only Memory (ROM) ، ومن أمثلة الذاكرة المتبخرة تلك التى يمكن

القراءة منها والكتابة فيها ويطلق عليها اسم الذاكرة العشوائية الاتصال – Random Access Memory (RAM) . يوجد أربعة أنواع من الذاكرة الدائمة كما يلي :

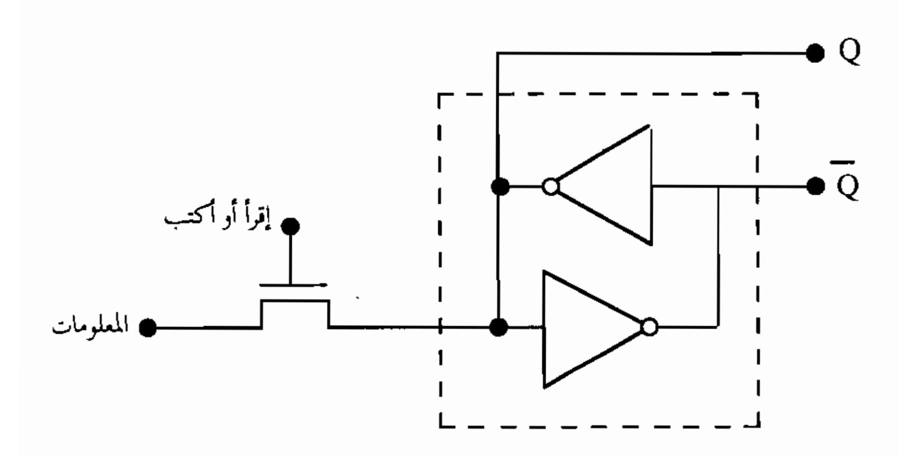
١ – ذاكرة مبرمجة فى المصنع حسب احتياج العمل ، ولا يمكن تغيير المخزون ، وتسمي ROM .

٢ – ذاكرة يمكن أن يبرمجها العميل بمعرفته ، ولكن لمرة واحدة فقط ، وتسمى PROM .

٣ – ذاكرة يمكن أن يبرمجها العميل بمعرفته ، ويمكن مسحها باستعمال الأشعة فوق البنفسجية وبرمجتها مرة أخرى ، ويمكن تكرار ذلك عدة مرات ، وتسمى EPROM .

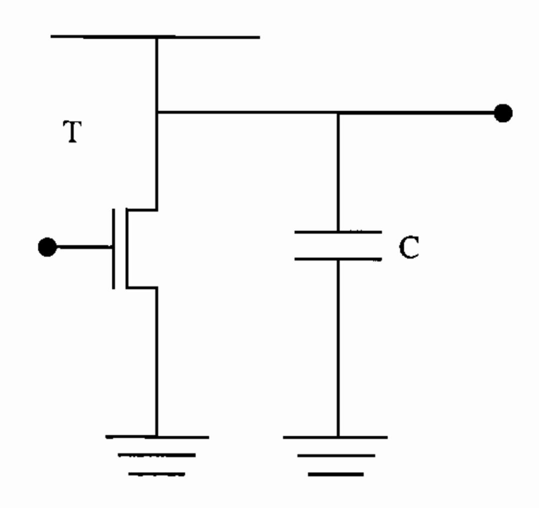
٤ – كالسابقة ، ولكن يتم المسح كهربيا ، وتسمى EEPROM .

الذاكرة العشوائية الاتصال – RAM نوعان . نوع إستاتيكى – SRAM يحتفظ بالمخزون مادامت الطاقة الكهربية متواجدة ، وخلية هذه الذاكرة تتكون من عاكسين فى دائرة معلقة ، كما هو موضح بالشكل (٦–١١) .



شكل (٦–11) : خلية الذاكرة الإستاتيكية .

النوع الآخر ديناميكى – DRAM يحتاج المخزون فيه إلى التجديد على فترات رغم استمرارية الطاقة الكهربية ، وخلية هذه الذاكرة تتكون من ترانزستور ومكثف كما هو موضح بالشكل (٦–١٢) . عندما يكون المكثف مشحوناً يكون المخزون "1" ، وعندما يكون المكثف مفرغاً يكون المخزون "0" . تمتاز الذاكرة الإستاتيكية بأنها لا تحتاج إلى تجديد المخزون ما دامت الطاقة الكهربية لم تنقطع ، ولكنها قليلة الكثافة على



شكل (٦-١٢) : خلية الذاكرة الديناميكية .

الشريحة ، تعانى الذاكرة الديناميكية من احتياجها إلى تجديد المخزون على فترات رغم استمرارية تواجد الطاقة الكهربية ، ولكنها عالية الكثافة على الشريحة . بسبب السعة الكبيرة لشريحة الذاكرة الديناميكية ، فإنها هى التى تستعمل فى ذاكرة الحاسبات الإلكترونية .

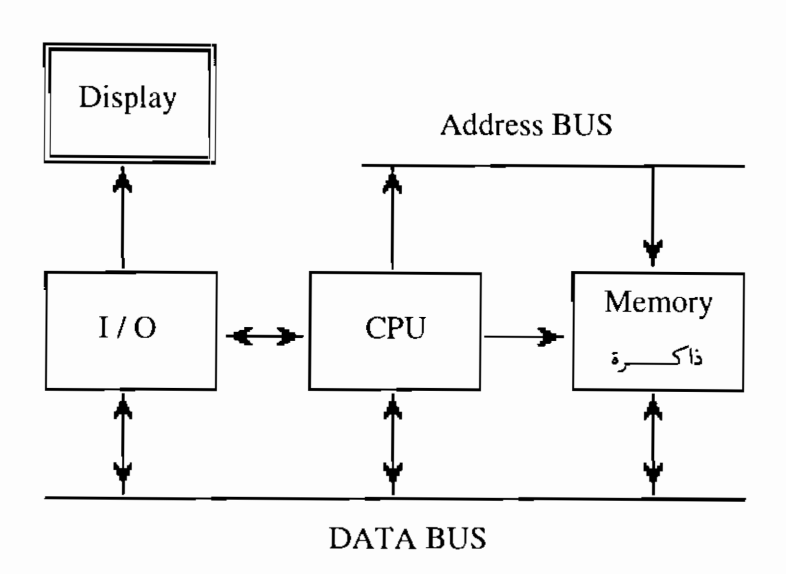
٥/٦ النظم الإلكترونية الرقمية

تتكون النظم الإلكترونية الرقمية من دوائر إلكترونية رقمية ، وتتعامل مع إشارات رقمية . هذه النظم هي المنتشرة حالياً فى عالم الإلكترونيات والاتصالات الكهربية والتحكم والحاسبات والشبكات . هناك حالياً سباق لتحويل النظم التماثلية إلى رقمية كلما أمكن ، والنظم التماثلية التى لم تتحول بعد إلى رقمية فى طريقها إلى ذلك ، حيث من المتوقع ألا يبق للنظم التماثلية إلا فجوات قليلة بالإضافة إلى مواقع حتمية مثل مواقع المواجهات عند مداخل ومخارج النظم الرقمية . تبدأ النظم الإلكترونية الرقمية من نظم صغيرة كجهاز قياس رقمى محمول أو تليفون محمول إلى نظم تشمل العالم بأكمله كسلسلة الأقمار الصناعية ونظام شبكة الإنترنيت . وقد انتشرت النظم الإلكترونية الرقمية فى جميع أوجه الحياة ، وغطت عديداً من المجالات لدرجة أنها أصبحت ملموسة للشخص العادى فى المنزل والمكتب والشارع . والتقدم فى هذه النظم سريع الإيقاع سواء فى التطور رأسياً فى المجال نفسه أو أفقيا فى الاتساع والانتشار إلى مجالات أخرى . رغم انتشار النظم الإلكترونية الرقمية وتداخلها المتشعب فى نسيج الحياة ، فإننا سنتعرض هنا باختصار لأهم سبعة مجالات فقط هى الحاسبات وشبكات الحاسب ، الاتصالات الكهربية ، الإلكترونيات الاستهلاكية ، الإلكترونيات الصناعية ، إلكترونيات الفضاء والتطبيقات الحربية ، الإلكترونيات الطبية ، القياسات والاختبارات

الآلية ، حيث سنتعرض باختصار شديد للوضع الحالى فى كل مجال وتوقعاته المستقبلية .

١/٥/٦ نظم الحاسبات وشبكات الحاسب

تعتبر الحاسبات حالياً من أكثر النظم الإلكترونية الرقمية شعبية . فكثيرون يمتلكون حاسباً من نوع أو آخر ، وأكثرون يستعملون الحاسبات ، والكل يسمع عنها . كما هو موضح فى الشكل (٦-١٣) ، يتكون الحاسب أساساً من خمسة أجزاء ملموسة رئيسية



شكل (٦-١٣) : الوحدات الأساسية المكونة للحاسب الإلكتروني .

هى وحدة المعالجة المركزية – Central Processing Unit (CPU) التى بها تتم العمليات المنطقية والحسابية ، وحدة الذاكرة ، مسار متعدد الخطوط – Bus لنقل المعلومات ، وحدة الدخل والخرج كلوحة المفاتيح مثلاً ، وشاشة العرض . كى يعمل جهاز الحاسب يلزم تحميله بخلفيات نظام تشغيل – Operating System (OS) ، وتواجد وحدة معجلات تسمى BIOS تعمل كوسيط بين نظام التشغيل وملموسات الجهاز . فى بداية عهد الحاسبات ، كان المنتشر هو حاسب الهيكل الرئيسى – Main Frame (MF) الذى تواجد فى الجامعات والمؤسسات الكبرى . ثم ظهر الحاسب الصغير – Mini Computer الذى تواجد أيضاً فى الجامعات والمؤسسات . مع التقدم فى الدوائر المتكاملة وظهور المعالج الدقيق – Microprocessor فى بداية السبعينيات ، تطورت الحاسبات إلى ظهور محطات التشغيل – Work Stations (WS) والحاسبات الشخصية – Personal Computers (PC) التى أصبحت فى متناول الأفراد مع

انتشارها بالجامعات والمؤسسات حيث غطت تقريباً على حاسبات الهيكل الرئيسى والحاسبات الصغيرة .

مع انتشار الحاسبات بأنواعها ، بدأ التفكير فى ربطها بشبكات ، أولاً محلية – Local Area Networks (LANs) ، ثم عالمية مثل الإنترنيت . فى شبكات الحاسب تستعمل حاسبات الهيكل الرئيسى والحاسبات الصغيرة كمساعدين – Servers ، بينما تستعمل محطات التشغيل والحاسبات الشخصية أحياناً كمساعدين وأحياناً كأطراف استخدام . هناك اتجاه حالياً لإنتاج أطراف استخدام منخفضة السعر بإمكانيات ذاتية أقل وتعتمد فى أدائها على قدرات الشبكة . يحتاج الحاسب فى مواجهته مع الشبكة إلى وحدة تعديل وكشف – Modem قادرة على التعامل مع الإشارات بسرعات عالية تصل إلى عشرات ميجاماك/ث .

رغم هذا النجاح والازدهار والانتشار فى الحاسبات والشبكات ، فإنها مازالت سريعة التطور ، والتنافس العالمى فيها على أشده .

٢/٥/٦ نظم الاتصالات الكهربية الرقمية :

فى النظم الحديثة ، يكاد يتلاشى الفرق بين شبكات الحاسبات وشبكات الاتصالات ، فكلاهما متجه حالياً فيما يعرف بنظام تعدد الأوساط – Multinedia على شبكة الإنترنيت . فى هذا النظام ، بالإضافة إلى نقل البيانات ، فإن الشبكة تنقل أيضاً الإشارات المسموعة والمرئية مما يسمح بعديد من الخدمات المضافة مثل الرؤية تحت الطلب – Video on Demand والمؤتمرات المرئية – Video Conferencing وغير ذلك . الإشارات المسموعة والمرئية تنبع وتعالج بأجهزتها الخاصة مثل أجهزة الإرسال وأجهزة الاستقبال وأجهزة الاستدعاء – Pagers وأجهزة الفاكس وأجهزة تحديد المواقع. تنتقل هذه الإشارات على مساراتها الخاصة من أسلاك نحاسية مجدولة أو كابلات محورية أو كابلات ألياف ضوئية قبل تحميلها على الشبكة من خلال وحدات التعديل والكشف – Modems . كما أن استعمال الأقمار الصناعية فى خدمات الاتصالات المحمولة فى سبيلها لتسهيل الاتصال بين أى نقطتين على الكرة الأرضية .

مع الاتجاه إلى ضم إمكانيات جهاز الحاسب الإلكترونى مع إمكانيات جهاز الاستقبال التليفزيونى فى جهاز واحد، ستتوحد وحدة التحكم عن بعد فى جهاز التليفزيون مع فأرة الحاسب – Mouse فى وحدة واحدة تجمع كل الإمكانيات والقدرة على التعامل . فمثلاً ، أثناء مشاهدة برنامج تليفزيونى وظهور إعلانات تجارية ، يمكن إتمام عملية الشراء بالتعامل مباشرة مع شاشة التليفزيون باستعمال الفأرة الموحدة . كذلك ، أثناء مشاهدة برنامج تليفزيونى ، بوضع سهم الفأر على رمز التليفون على الشاشة ، يمكن إتمام مكالمات تليفونية صادرة أو واردة من خلال جهاز التليفزيون نفسه ثم العودة إلى البرنامج نفسه بعد إتمام المكالمة ، وهكذا .

٣/٥/٦ نظم الإلكترونيات الاستهلاكية الرقمية

المقصود بنظم الإلكترونيات الاستهلاكية الرقمية تلك النظم الإلكترونية الرقمية التي تستعملها عائلة متوسطة بالمنزل ، أو مهنى بالمكتب ، أو فرد بذاته . قد تكون هذه النظم وحدات مساعدة كوحدة التحكم فى الغسالات الأتوماتيكية والأفران ووحدات الاستشعار وتسجيل البيانات فى آلات التصوير الحديثة ، أو نظم متكاملة كجهاز التليفزيون وأجهزة تسجيل الفيديو ونظم التخاطب وغير ذلك .

فيما يختص بالنظم المساعدة ، فربة المنزل تستعمل نظاماً من هذه النظم حينما تختار برنامج غسيل من بين عدة برامج متاحة . كذلك فى آلات التصوير الحديثة تستعمل مثل هذه النظم لتحديد فتحة العدسة وتركيز الصورة وضبط زمن العرض آليًا ، وكذلك تسجيل بيانات إضافية خاصة بكل صورة كمناسبة وتاريخ أخذها وحجم وعدد النسخ المطلوبة منها وغير ذلك . تستعمل هذه النظم المساعدة دوائر إلكترونية متكاملة تصل أحياناً إلى مستوى المعالج الدقيق – Microprocessor أو المحكم الدقيق – Micerocontroller .

فيما يختص بالنظم المتكاملة ، فمن أهمها جهاز الاستقبال التليفزيونى الذى يتسابق حالياً مع جهاز الحاسب الإلكترونى للفوز بلقب الجهاز الأول فى المنزل أو المكتب الحديث . التطور المهم فى مجال التليفزيون حالياً هو الاتجاه إلى الإرسال والاستقبال التليفزيونى الرقمى العالى الجودة – High Difinition TV (HDTV) .

كذلك ، فإن شاشة العرض التليفزيونى المسطحة ببعد قطرى أكثر من ٤٠ بوصة وسمك ١٠ سم ، والتى تعتمد على تكنولوجيا البلازما الغازية فى طريقها إلى الظهور . ولا أستبعد أن تتطور شاشة العرض مستقبلاً إلى شاشة رقيقة ملفوفة يمكن فردها عند الاستعمال . فى الوقت نفسه هناك تقدم فى الوحدات التى تخدم كلاً من جهاز التليفزيون وجهاز الحاسب الإلكترونى . فالقرص الصلد – Compact Disc (CD) تطور إلى قرص صلد يمكن الكتابة عليه – CD-RW . كما ظهرت وحدة تسمى قرص الفيديو الرقمى – Digtal Video Disc (DVD) يمكن تخزين فيلم سينمائى كامل عليها . وسبق ذلك ظهور آلات تصوير الفيديو الرقمية منذ عام ١٩٩٥ .

٤/٥/٦ نظم الإلكترونيات الصناعية الرقمية

معظم نظم الإلكترونيات الصناعية الرقمية تدور حول التحكم فى إدارة وتغيير سرعات موتورات كهربية من أصناف مختلفة بأحجام وطاقات مختلفة . ينقسم أى من هذه النظم إلى شقين . الشق الأول هو الشق التابع الذى يتحكم مباشرة فى توصيل الطاقة الكهربية إلى الوحدة تحت التحكم . يتكون هذا الشق أساساً من نبائط لها خاصية القطع والوصل عند جهود وتيارات تصل أحياناً إلى آلاف الفولتات وآلاف

الأمبيرات . تقع هذه النبائط فى مجال إلكترونيات القوى – Power Elctronics ، ومن أمثلتها الثايرستور العادى ، والثايرستور الذى يمكن قطع التيار المار به عن طريق بوابة – Gate Turn Off (GTO) ، والترانزستور ثنائى الاستقطاب ذو البوابة المعزولة – IGBT . الشق الثانى للنظام هو الشق المتبوع الذى يحدد أى النبائط تكون فى حالة قطع وأيها فى حالة توصيل ، وزمن فترة هذا القطع أو التوصيل حسب تصميم النظام كى يفى بالغرض المطلوب . يتكون هذا الشق أساساً من دوائر متكاملة متباينة ، بما فى ذلك المعالج الدقيق والمحكم الدقيق .

فى مجال إلكترونيات الطاقة ، يعتبر الترانزستور الثنائى الاستقطاب ذو البوابة المعزولة حالياً الاختيار الأمثل حتى أحمال تصل إلى ١٥٠٠ أمبير و ٣٥٠٠ فولت . ففى هذا المدى ، حل هذا الترانزستور محل الثايرستور GTO بسبب انخفاض طاقة الفقد وسرعة الأداء التى تتعدى ١٠٠ كيلوهرتز . فى محاولة كى يحتفظ الثايرستور GTO بمكانته ، فقد تم تطويره على رقيقة بقطر ١٥ سم بحيث يعمل عند أحمال تصل إلى ٦٠٠٠ أمبير و ٦٠٠٠ فولت .

فى شق الإلكترونيات الدقيقة ، فهو الشق المفكر فى النظام والذى يحدد نوعيته من حيث إذا كان من نوع التحكم المنطقى المبرمج – Programmable Logic Control (PLC) أو التحكم العددى بالحاسب – Computer Numerical Control (CNC) أو غير ذلك . بما أن التطبيقات محددة لأغراض صناعية معينة ، فإن الحاسبات المستعملة ، وتسمى الحاسبات الصناعية ، أقوى فى الأداء وأصغر فى الحجم ، وقد تتكون أحياناً من كارت واحد . هذه الحاسبات تستعمل قمة التكنولوجية المتاحة سواء من ناحية اختيار المعالج الدقيق أو المحكم الدقيق ، مع استعمال أكثر من معالج دقيق على التوازى أحياناً لزيادة السرعة . ويمكن أن يتصل هذا الشق بشبكات محلية أو شبكات أوسع بما فيها الإنترنيت .

بسبب تشعب وتعقيد نظم الإلكترونيات الصناعية الرقمية الحديثة ، هناك اتجاه للاتفاق على تصميم هذه النظم على أسس مفتوحة ، بحيث يمكن تبادل الوحدات بين النظم المختلفة بدلاً من غلق كل نظام على نفسه واحتكاره لاستراتيجية ذاتية فى الإحلال والتطوير والتجديد . كما أن الروبوت – Robot الذى كان قد بدأ يتوارى عام ١٩٩٣ ، بدأ ثانية فى الانتعاش والنمو .

٥/٥/٦ نظم إلكترونيات الفضاء والتطبيقات الحربية

تكنولوجيا الفضاء ، رغم أنها أكثر التكنولوجيات تقدماً وعمقاً وتعقيداً ، فإنها أيضاً تكنولوجيا لها شعبيتها من حيث إنها دائماً فى الأخبار وتتداولها جميع وسائل الإعلام أولاً بأول ، ويتابعها الأفراد على جميع مستوياتهم فى جميع أنحاء العالم .

تكنولوجيا الفضاء تشمل عديداً من التكنولوجيات نخص بالذكر منها ثلاثة تكنولوجيات رئيسية . الأولى هى تكنولوجيا القوى الميكانيكية التى عن طريقها أمكن إعطاء الصاروخ الطاقة اللازمة لدفعه خارج مجال الأرض إلى الفضاء الخارجى . الثانية هى تكنولوجيا المواد التى عن طريقها أمكن الحصول على المواد التى تتحمل الحرارة والإجهادات الهائلة ، التى تتعرض لها أسطح هذه الصواريخ وغرف الاحتراق وغيرها . الثالثة هي تكنولوجيا الإلكترونيات التى بها يمكن التحكم فى مسار الصاروخ، ومنها تتكون نظم القياس والتحكم والإرسال والاستقبال المتواجدة في الحمل الفعال الذي يدور في الفضاء بعد استهلاك صاروخ الدفع ، وكذلك قنوات الاتصال بينه وبين المحطات الأرضية المختصة بالمتابعة والإشراف .

ليست تكنولوجيا الفضاء رفاهية وإهدار كما قد يتصور البعض . فهي تمثل مدارس ومعامل أبحاث وورش عمل تلقي بدلوها في عديد من المجالات التي تخدم البشرية بطرق مباشرة وغير مباشرة . فبالإضافة إلي اكتشافات الفضاء نفسها المثيرة والمفيدة قطعا لجيلنا والأجيال القادمة ، فإن تكنولوجيا الفضاء لها الفضل في تطور الطيران المدني والحربي إلى الصورة التى نراها اليوم بما في ذلك طائرات الركاب الحديثة التى تصل سرعات بعضها إلي ضعف سرعة الصوت والطائرات الحربية المتقدمة ذوات القدرات الخارقة . كذلك ، تطوير نظم الليزر المضادة للصواريخ ، وعواكس البلازما لهوائيات الرادار التي تعطي أجهزة الرادار إمكانيات تكتيكية هائلة في الحروب . ولولا تكنولوجيا الفضاء ، ما ظهرت معظم المواد الحديثة التى تستخدم في مختلف الصناعات من سبائك معدنية ومواد بلاستيكية ومواد لاصقة وخلافه ، وما ظهرت الأقمار الصناعية وما تطورت نظم الاتصالات الرقمية لما نراه اليوم من أجهزة وشبكات بما في ذلك شبكة الإنترنيت .

واضح أنه لولا تكنولوجيا الإلكترونيات الدقيقة عامة ، والدوائر المتكاملة الشديدة الإتساع– VLSI بصفة خاصة ، ما أمكن التوصل أو حتي التفكير في كل هذا .

٦/٥/٦ نظم الإلكترونيات الطبية الرقمية

بفضل نظم الإلكترونيات الطبية الرقمية ، أصبح الطبيب قادراً علي القيام بجولة داخل جسم الإنسان دون أن يترك كرسى مكتبه . بالإشارة إلى دليل وضغطة على زر الفأرة – Mouse ، يظهر أمامه على شاشة الحاسب الإلكترونى المنطقة التى يرغب فى رؤيتها ، دليل آخر وضغطة أخرى يستطيع التركيز على نقطة محددة داخل هذه المنطقة لاكتشاف دقائق وتفاصيل معالمها . يستطيع الطبيب أن يفعل كل هذا وأكثر ويكتفى بالمشاهدة أو ، إذا أراد ، بالإشارة إلي دليل ثالث وضغطة على زر الفأرة يحصل على أى عدد من النسخ المطبوعة لأى منظر يرغبه . هذا مجرد عينة من التسهيلات التى قدمتها

الإلكترونيات لعالم الطب . كذلك ، فإن معظم الأطباء حالياً على اتصال بشبكة الإنترنيت ، ويمارسون الخدمات المذهلة التى تقدمها لهم فى مجالات تخصصاتهم . هذا بالإضافة إلى فيض من الأجهزة المتنوعة التى تساعدهم فى أداء مهامهم من كشف وتحليل وتشخيص وعلاج .

كما هو الحال دائماً ، فالإلكترونيات لا تهدأ ، ولا تتوقف يوماً عن تقديم ما هو جديد . إذا التفتنا إلى الجديد الذى تقدمه الإلكترونيات لعالم الطب ، سنرى الكثير ، سأكتفى هنا بالتركيز على مثالين اثنين فقط . الأول يتعلق بجراحة المخ . فالمعروف الآن أن أهم وسيلة لتعرُّف أماكن الخلل بالمخ ، سواء ورم أو انسداد ، هى التصوير بالرنين المغناطيسى – Magnetic Resonance Imaging (MRI) . هذه الوسيلة تحدد فقط مكان الخلل ، وتترك العلاج لنظم الجراحة التقليدية . تم حالياً، وعلى مدى أكثر من عشرة أعوام من البحث والتجارب ، تطوير نظام مغناطيسى آلى لتسهيل جراحات المخ ، من المتوقع تجربته إكلينيكياً هذا العام ١٩٩٩ . يتكون هذا النظام من مجال مغناطيسى قوى ، شدته ٣ تسلا ، يتم توليده باستعمال ملفات كهربية من أسلاك فائقة التوصيل – Superconducting لتقليل طاقة الفقد . يوضع رأس المريض داخل هذا المجال المغناطيسى القوى الذى يتحكم فى تحريك قسطرة – Catheter تحت غشاء الأم الجافية – Dura mater بمعدل نصف ملليمتر فى الثانية. تتكون القسطرة مـن سلك داخـل جراب وفى مقدمته مغناطيس أسطوانى صغير قطره ٢,٣ سم وطوله ٦ سم . فى الوقت نفسه يمكن تحديد مكان رأس القسطرة بدقة متناهية ، ورؤيتها مع صورة المخ على شاشة الحاسب الإلكترونى عند تقاطع ثلاث شعرات عمودية تمثل الأبعاد الثلاثة . عند وصول رأس القسطرة عند المكان المطلوب ، يتم سحب السلك والمغناطيس ويبقى الجراب المبستر الذى من خلاله يمكن إتمام العلاج الذى ممكن أن يكون استئصال ورم ، أو فتح انسداد ، أو حقن جرعة إشعاعية ، أو غير ذلك . المثال الثانى يتعلق بمشروع دولى كبير بدأ عام ١٩٩١ م ، ومتوقع له أن ينتهى عام ٢٠٠٦م . هذا المشروع ممول أساساً من مؤسسات بالولايات المتحدة الأمريكية وإنجلترا بمبلغ إجمالي ٣ بلايين دولار أمريكى ، ويسمى – Human Genome Project . الهدف من هذا المشروع هو حل ألغاز وتصنيف الثنائيات النووية فى الكروموزومات البشرية . فالمعروف أن عدد الجينات المورثة فى الإنسان يبلغ مائة ألف . تتجمع هذه فى ثنائيات بعدد يزيد عن ثلاثة بلايين . هذه الثنائيات مجمعة من الأربعة مكونات المعروفة للأحماض الأمينية الحلزونية التشكيل – Dioxyribo Nuclic Acid (DNA) . لحل ألغاز وتصنيف هذه الثنائيات الفلكية العدد ، يتم وضعها على شرائح زجاجية كما توضع الترانزستورات على شرائح السيليكون فى النظم الإلكترونية ، ويطبق عليها برامج

خاصة للتصنيف مثل المسح – Scanning ، والبحث – Search، وقواعد البيانات – Database ، مع الاستعانة بمضيئات كيميائية لتمييزها على شاشة الحاسب . واضح أن هذا موضوع كبير ومتخصص فى مجالات البيولوجيا والطب ، ويستعين بتكنولوچيا الإلكترونيات وحزم خلفية عديدة ومتقدمة ، ولا مجال هنا للتعرض لتفاصيل أكثر . وقد تم فعلاً إعلان ٩٠ ٪ من المستهدف فى منتصف عام ٢٠٠٠ .

٧/٥/٦ نظم القياسات والاختبارات الآلية

علم دون تقنين وقياس ، ظلام وتخبط ، ونظم دون اختبار وصيانة ، تخريب وإهدار . هذه مبادئ أساسية لأى نشاط بشرى لم ولن يتغير ، وتنطبق على الماضى والحاضر والمستقبل .

توفير أجهزة القياس الأمينة والكافية مطلب أساسى لحسن أداء أى نظام ، كما أنها نقطة الارتكاز للاختبار والتشخيص والصيانة . بالتركيز على ما نحن بصدده ، وهو هندسة الإلكترونيات ، فإن من أبرز ما يهمنا قياسه هو الجهد الكهربى ووحدته الفولت، والتيار الكهربى ووحدته الأمبير ، والمقاومة أو الممانعة ووحدتها الأوم ، والمجال المغناطيسى ووحدته تسلا ، ومشتقات هذه المتغيرات من طاقة وقدرة وخلافه . إذ تركنا جانباً أجهزة القياس القديمة بأحجامها الكبيرة وإمكانياتها المحدودة ، فإن أجهزة القياس الحديثة معظمها رقمية متعددة الأداء متشعبة الإمكانيات صغيرة الحجم وفى الوقت نفسه سهلة الاستعمال . كمثل لهذه الأجهزة ، توجد حالياً أجهزة قياس محمولة فى كفة اليد الواحدة وتجمع بين راسم موجات حتى تردد ١٠٠ ميجاهرتز ، وقياس الجهد والتيار والممانعة حتى تردد ٥٠ ميجاهرتز ، والزمن حتى ٢٠٠ بيكوثانية ، وبها ذاكرة ٣٠ كيلو ماك قادرة على تخزين ١٥٠ شاشة للراسم ، ويمكن ربطها بحاسب إلكترونى لتوسعة إمكانياتها . ومازال الاتجاه مستمراً إلى التصغير فى الحجم والزيادة فى الإمكانيات والسرعة فى الأداء مع التخفيض فى الأسعار . أيضاً ، تنتشر حالياً نظم قياس متكاملة تجمع بين أكثر من وحدة قياس على الكارت الواحد لتقليل عدد الكروت ، وبالتالى حجم النظام ككل . لم يكن ليتم كل هذا التطور لولا فضل استعمال تكنولوچيا الإلكترونيات الدقيقة ، وخاصة المعالجات الدقيقة والمحكمات الدقيقة ووحدات الذاكرة الحديثة . كذلك ، مع انتشار النظم الرقمية فى جميع المجالات الإلكترونية ، وما تبعها من التزام بمواصفات قياسية محددة لكل مجال ، فقد ازداد الطلب على أجهزة قياس موصفة التطبيق – Application Specific ، بمعنى أن يكون لكل مجال أجهزته الخاصة مصممة خصيصاً لقياس مواصفاته القياسية والتحقق منها .

من ناحية الاختبار والتشخيص والصيانة ، فالتطورات لم تكن اختيارية ، بل ملزمة وأكثر عمقاً . فمع ظهور الدوائر المتكاملة وتطورها حتى الدوائر المتكاملة الشديدة

الاتساع – VLSI ، التى تمثل فى ذاتها نظاماً على شريحة ، وتجميع هذه الدوائر المتكاملة على كروت دوائر مطبوعة ، ثم تجميع هذه الكروت فى وحدات ، وتكوين نظام متكامل من هذه الوحدات ، كل هذا وضع الاختبار والتشخيص والصيانة فى وضع مختلف تماماً عما كان عليه الحال أيام استعمال النبائط المنفردة ، سواء كانت الصمامات المفرغة أو الترانزستورات . دون الدخول فى تفاصيل ، يكفينا القول فى هذا الخصوص أن الاختبار اليدوى حالياً مستحيل ، والاختبار النصف آلى محدود ولا يصلح إلا للنظم الصغيرة ، والواضح الآن هو حتمية الاختبار والتشخيص الآلى . لهذا ، تطور الاختبار والتشخيص للنظم الإلكترونية الرقمية إلى فرع علمى كامل من أفرع الإلكترونيات الدقيقة على قدم المساواة مع أفرع تصميم وتنفيذ النظم نفسها . كما أصبحت مسئولية تسهيل الاختبار تؤخذ فى الحسبان منذ البداية عند وضع مواصفات النظام . أدى هذا إلى تطوير وظهور عديد من نظم الاختبار الآلي تشترك جميعها فى الحاجة إلى تصميم وتنفيذ دوائر إضافية سواء على الشريحة أو على الكارت بغرض تسهيل الاختبار والتشخيص بمساعدة عديد من الآليات الخلفية المعقدة والمطورة خصيصاً لتنفيذ ذلك علي الحاسب الإلكترونى . يختلف الاختبار والتشخيص الآلي أثناء التصميم عنه أثناء التصنيع عنه عند الاستعمال . ففى أثناء التصميم يتم الاختبار الآلى على كل مرحلة على حدة قبل الانتقال إلى أخرى ، ويسمى الاختبار فى هذه المرحلة تحقيق التصميم Design Verification ، وتستعمل تغذية خلفية لتصحيح الأخطاء أولاً بأول . فى أثناء التصنيع ، يتم الاختبار على المنتج النهائى لتسويق السليم وتكهين غير السليم . أما عند الاستعمال ، فيتم الاختبار والتشخيص الآلى والصيانة على مراحل ، كما يلى :

١ – الفحص الذاتى – Self Checking على مستوى الوحدة أو النظام . وهذا يستعمل دوائر خاصة تعطى إنذاراً ضوئيًا أو سمعيًا فى حالة العطل . وهذا الفحص يحدد العطل عادة فى كارت معين .

٢ – الاختبار والتشخيص الآلى للكارت ، حيث يوجد عديد من الطرق الغرض منها تحديد العطل إما فى وصلة بين الشرائح أو فى شريحة معينة .

٣ – إصلاح الوصلة أو تغيير الشريحة .

خـــاتمة

يمكن أن نستمر فى هذه الرحلة بلا نهاية ، خاصة وأنها تتعرض لموضوع هندسة الإلكترونيات الذى يتصف بالتشعب والامتداد ، علاوة على اعتماده على قاعدة عريضة من تخصصات مختلفة كالكيمياء والطبيعة والرياضيات . ولكن بما أن الهدف محدود، والزمن أيضاً محدود ، كان لابد من فرض نهاية بشرط أن تكون منطقية ومقبولة . ورغم النظرة الطائرة التى يتسم بها هذا العرض ، فإنه لم يتعرض لجميع أوجه الإلكترونيات . كما أن المواضيع التى تعرضنا لها لم نتعمق فى أى منها حتى لا نخرج أو نشط بعيداً عن الرحلة التى حاولت بقدر الإمكان ، وبحمد الله ، أن تكون رحلة محدودة ولكن واعية .

من المواضيع التى لم نتعرض لها مثلاً ، الإلكترونيات الضوئية وبعض التطبيقات الخاصة . كان الهدف دائماً هو تعرّف المبادئ الأساسية وتطورها أكثر من سرد التطبيقات وتنوعها . فالمبادئ الأساسية تتسم بالأهمية والثبات ، أما التطبيقات ، رغم أهميتها ، فهى اجتهادات قابلة للتعديل والتغيير ، ويحكمها التقدم التكنولوچى والمهارات البشرية . وقد روعى فى العرض الدقة مع البساطة بقدر الإمكان بحيث يستوعبه القارئ العادى بقدر يمكنه من استيعاب وتفهم قراءات أو عروض أخرى مشابهة أو مقارنة ، ويستفيد منه الدارس بإثارة حماسه وترغيبه فى العلم على أنه رحلة ممتعة وليس كابوساً مملاً ، ويتقبله المتخصص كوجهة نظر فى العرض والحوار . والأمل أن يصلح العرض كخلفية مفيدة لمن يريد أن يتعمق .

بدأت فكرة توصيف هذه الرحلة باللغة العربية عن قناعة بمسئولية وواجب المشاركة فى إثراء المكتبة العربية لصالح القارئ العربى . فالإنسان ، وخاصة الشباب ، ثروة من عند الله ، إذا أهملت ، حادت وتشتتت ، وأصبحت عبئاً على الوطن . فالشباب فى حاجة إلى من يقدم له النصح المخلص والعرض الطيب والقدوة الحسنة ، وهذه مسئولية كل متخصص فى مجاله ، سواء كانوا رجال دين ، أو مدرسين ، أو أساتذة جامعات ، أو علماء ، أو ساسة ، أو غير ذلك .

هناك تهافت حالياً على الاستقبال التليفزيونى الذى كثرت مصادره ، وصل إلى حد الإدمان عند البعض . وتخيل كثيرون أن برامج التليفزيون تغنى عن الكتب التى اعتبروها من مخلفات الماضى . وهذا اتجاه خاطئ وضار بالأفراد والمجتمع والأوطان .

فبرامج التليفزيون ، حتى العلمية والتسجيلية منها ، مهما بذل من جهد فى إعدادها ، فهى ضحلة جداً إذا ما قورنت بكتب جيدة التأليف فى المواضيع نفسها . هذا علاوة على قلة هذه البرامج بجوار برامج العنف والجنس والمخدرات التى تقتل محاسن الإنسان وتنمى مساوئه ، وفى اعتقادى أن ما تقاسيه البشرية حالياً من إرهاب وتلوث وكوارث وليد هذا التيار المخرب . وكما يقال بصدق وأمانة «التليفزيون فتنة العين ، والكتاب غذاء العقل» .

العلم أساساً ما هو إلا اكتشاف لمعطيات الخالق بقدر ما تتسع مدارك الإنسان وفكره، وبما أن معطيات الخالق لا تحصى ، فالاكتشافات لن تنتهى ، وقد شاركت البشرية جمعاء منذ بدايتها فى بناء ما نحن فيه الآن من معارف وتكنولوچيا . تم ذلك على مدى حضارات متوالية يذكر التاريخ منها حضارات قدماء المصريين والبابليين والآشوريين والإغريق والفرس والرومان والعرب ثم عصر النهضة الأوروبية فالحضارة الحديثة . من هذا يتضح أن المعارف والتكنولوچيا ليست حكراً على جنس دون آخر ، بل تناوبتها الأجناس على مدى التاريخ فى دورات زمنية طالت أو قصرت . يلاحظ أن هذه الصفة الدورية هى سمة الحياة فى جميع أوجهها ودون استثناء ، وعلى ذلك ليس صحيحاً ما يقال أحياناً أن قطار العلم والتكنولوچيا قد يفوت جنساً معيناً أو شعباً معيناً مهما طال الزمن . وليس هناك مبرر أن يستسلم أحد فى أى مكان إلى اليأس أو فقدان الثقة ما دام قادراً على المشاركة فى العطاء فى مجال يفيد البشرية . فالعمل الجيد إذا لم يثمر اليوم ، فقطعاً سيثمر غداً .

الأعمال الجادة الهادفة تنبع من القلب وتخلق مجتمعاً وصرحاً قوياً يصمد أمام العواصف ، أما الأهواء فتنبع من الشهوات وتخلق مجتمعاً مفككاً وبنياناً هشا ينهار أمام أضعف الرياح . نحن نعيش فى عالم لا يرحم ، من لا يحمى نفسه لن يحميه أحد . ولن يحمى أحد نفسه إلا إذا كان قد أعد لذلك مسبقاً ، فعند الخطر لن يكون هناك وقت للإعداد .

الهدف من هذا الكتاب هو المساهمة فى نشر الوعى العام فى مجال تخصصى ، والمشاركة مع رحلات علمية فى مجالات أخرى ، تتطور مع الزمن لإثراء المكتبة العربية فى جميع المجالات بمشيئة الله . وإذا لم يطل بنا العمر كى نرى ما نأمله ، فعلى الأقل نمهد الطريق للأجيال القادمة كى يصلوا إلى ما يأملون لأنفسهم ونأمله نحن لهم ، بإذن الله .

References مراجـع

01- J. R. Partington : "A Text-Book of Inorganic Chemistry", Macmillan and Co., 1933.

02- A. d' Abro : "The Rise of the New Physics", vol. 1, Dover, 1951.

03- A. d' Abro : "The Rise of the New Physics", vol 2, Dover, 1952.

04- Encyclopedia Brittanica, As Required.

05- John C. Slater : "Modern Physics", McGraw-Hill, 1955.

06- Bryan Morgan : "Men and Discoveries in Electricity", John Murray, 1957.

07- D. G. Cooper : "The Periodic Table", Butterworths Scientific Publications, 1958.

08- E. A. Talkhan : "Introduction to Modern Electronics", Anglo Egyptian, 1971.

09- Sir Alan Gardiner : "Egyptian Grammar", Third ed., Oxford University Press, 1973.

10- D. G. Fink, and D. C. Christiansen, eds. : "Electronics Engineers Handbook", McGraw-Hill, 1982.

11- F. Mazda, ed. : "Electronics Engineer's Reference Book", Butterworths, 1983.

12- A. Ralston, and E. D. Reilly, eds. : "Encyclopedia of Computer Science and Engineering", Van Nostrand Reinhold Company, 1983.

13- M. Morris Mano : "Digital Design", Prentice-Hall, 1984.

14- Stillman Drake : "Galileo", Oxford University Press, 1987.

15- E. S. Yang : "Microelectronic Devices", McGraw-Hill, 1988.

16- أ. د. عبد العزيز صالح : / الشرق الأدنى القديم / ، مكتبة الأنجلو المصرية ، ١٩٩٥ .

17- Each January Issue of the IEEE Spectrum.



المؤلـف

حصل المؤلف علي البكالوريوس من كلية الهندسة - جامعة القاهرة عام ١٩٥٣ ، والدكتوراه من جامعة مانشستر بإنجلترا عام ١٩٥٨ . تدرج فى وظائف هيئة التدريس بقسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات الكهربية بكلية الهندسة - جامعة القاهرة إلى أن شغل منصب رئيس القسم فى الفترة من ١٩٨٤ إلى ١٩٩٠ ، ثم أستاذ متفرغ للإلكترونيات بالقسم نفسه حتى الآن ، والمؤلف عضو ومقرر اللجنة العلمية الدائمة لترقية أعضاء هيئة التدريس بالجامعات المصرية فى تخصص هندسة الإلكترونيات والقياسات الكهربية والهندسة الحيوية الطبية منذ عام ١٩٨٠ حتى الآن . للمؤلف عديد من المقالات العلمية المنشورة فى مجالات علمية عالمية ، وشارك فى عديد من المؤتمرات العالمية والمحلية فى تخصصه ، وله ثلاث براءات اختراع مسجلة عالميًا باسمه منذ عام ١٩٥٩ . قاد المؤلف مجموعات بحثية عديدة فى مجال الإلكترونيات الدقيقة ، بعضها ممول من أكاديمية البحث العلمى والتكنولوجيا المصرية ، والبعض الآخر ممول من برنامج المعونة الأمريكية ، وتم بالتعاون مع معهد ماساشوسيتس وجامعات ستانفورد وجورج واشنطن بالولايات المتحدة الأمريكية . سبق أن نشر للمؤلف كتاب باللغة الإنجليزية فى هندسة الإلكترونيات عام ١٩٧١ ، كما أنه حصل على جائزة الدولة التشجيعية فى العلوم الهندسية عام ١٩٨٩ ، ونوط الامتياز من الدرجة الأولى عام ١٩٩٥ .

رقم الإيداع ١٦٨٨١/٢٠٠٠

مطابع الدار الهندسية
تليفون/فاكس : ٥٤٠٢٥٩٨